



Rafael Oliveira Salgado

Licenciatura em Ciências da Engenharia Electrotécnica e de
Computadores

Implementação experimental de um gerador de relutância variável

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Co-Orientadores: João Francisco Alves Martins, Professor Associado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Vítor Manuel de Carvalho Fernão Pires, Professor Coordenador, Escola Superior de Tecnologia de Setúbal / Instituto Politécnico de Setúbal

Júri

Presidente: Doutor Nuno Filipe Silva Veríssimo Paulino - FCT/UNL

Vogais: Doutor Victor Manuel de Carvalho Fernão Pires -
EST/IPS (Co-Orientador)

Doutor Daniel José Medronho Foito - EST/IPS (Arguente)

Janeiro, 2020



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Resumo

A máquina de relutância é conhecida por ser uma máquina robusta e de baixo custo. Necessita, no entanto, de um conversor eletrónico de potência que assegure a interligação entre a fonte de energia e a carga. Deste modo, para a utilização deste tipo de máquina, a utilização de um conversor eletrónico de potência é de importância crítica. Nesse sentido, a adoção e dimensionamento deste conversor deverão ser efetuados de forma criteriosa. Outro dos fatores a considerar é o facto da máquina funcionar como motor ou gerador. Grande parte do trabalho que tem sido desenvolvido para esta máquina é para o seu funcionamento como motor. Neste contexto, este trabalho irá focar-se no desenvolvimento do conversor eletrónico de potência para a utilização da máquina como gerador. Assim, será apresentado um modelo de simulação para a máquina e conversor, assim como, o respetivo controlador. O desenvolvimento do protótipo do conversor para utilizar a máquina como gerador será descrito de uma forma pormenorizada. Serão também apresentados diversos resultados experimentais obtidos a partir do protótipo desenvolvido.

Palavras chave: Máquina de relutância variável, conversores de potência DC-DC, gerador de relutância, controlo da máquina de relutância.

Abstract

Reluctance machine is known as a robust and low-cost machine. However, this machine needs a power electronic converter which assures the connection between the energy source and the load. Having this in consideration, the usage of an electronic power converter has a critical importance. In this way, the adoption and sizing of this converter must be carefully designed. Other factor to consider is that the machine can operate as motor and generator. Most of the work done until now on this machine, only considers their operation as motor. In this context, this work will focus on the development of the electronic power converter to use the machine as generator. Thus, it will be presented a simulation model to the machine and the converter, as well as, the respective controller. The development of the converter prototype that allows the machine work as generator will be described in detail. Also, will be presented several experimental results collected from the developed prototype.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer aos Professores João Martins e Vítor Pires. Sempre que foi necessário estiveram disponíveis para me ajudar e disponibilizaram todos os meios necessários para este trabalho acontecer.

Sem os meus pais não teria sido possível. Sempre me acompanharam e ajudaram da melhor forma que conseguiram. Por muitos motivos são uma inspiração e um orgulho, por isso este trabalho é dedicado a eles.

Agradecer ao meu irmão, Diogo, pelo conhecimento que sempre me passou e pela forma como me ajudou a progredir como pessoa. É um exemplo e sempre que foi preciso estive lá para mim, por isso é uma referência no meu percurso académico e pessoal.

A todas as pessoas que conheci e me ajudaram na faculdade, principalmente aos meus amigos Rafael Oliveira, Diogo Palaio, João Quintaneiro, Pedro Alves, Pedro Ortiz, Luís Prata e Rodrigo Marreiros. Provavelmente sem vocês não estaria a escrever isto.

À Leila Alves, ao Joel Santos, ao João Cardoso, à Inês Temporão, ao João Silva e ao Fábio Fernandes pela amizade de sempre e por todo o incentivo que sempre me deram.

À Solange por toda a amizade, companheirismo e pelo seu sorriso. Acompanhou-me ao longo de todo este trabalho e apoiou-me como ninguém.

A todos, muito obrigado.

PS: Palaio, promessas não se esquecem. Está feito!

Índice de Figuras

Figura 1 - Máquina de Relutância Variável	6
Figura 2 - Perfil: indutância (L).....	7
Figura 3 - Corte transversal Máquina de Relutância 6/4	8
Figura 4 - Interface Eletrônica de Potência	10
Figura 5 - Conversor assimétrico em meia ponte.	12
Figura 6 - Conversor de enrolamento de fase compartilhado.	14
Figura 7 - Conversor de comutador compartilhado.....	15
Figura 8 - Conversor síncrono em ponte completa.....	16
Figura 9 - Topologia conversor C-Dump [7].	17
Figura 10 - Conversor Sood.	19
Figura 11 - Conversor Oulton.	20
Figura 12 - Conversor Buck-Boost.	21
Figura 13 - Topologia Conversor Bifilar	23
Figura 14 - Conversor de enrolamento de comutação auxiliar.	24
Figura 15 - Conversor R-dump.	25
Figura 16 - Conversor ressonante série.	26
Figura 17 - Conversor em meia ponte.	28
Figura 18 - Bloco Regulator (8/6) do modelo motor Simulink.	30
Figura 19 - Modelo motor Simulink.	31
Figura 20 - Simulação de uma máquina de relutância com 4 fases (gerador).	33
Figura 21 - Corte transversal da máquina de relutância 8/6.	35

Figura 22 - Perfil de indutância da máquina de relutância 8/6.	35
Figura 23 - Simulação Sensor de Posição do rotor da máquina de relutância 8/6.	36
Figura 24 - Simulação Controlo (vista geral).	37
Figura 25 - Simulação Controlo de Corrente.	38
Figura 26 - Simulação Conversor.	39
Figura 27 - Simulação fase da máquina.	41
Figura 28 - Perfil de indutância da fase 1.	42
Figura 29 - Simulação indutância (L) da fase 1 da máquina.	43
Figura 30 - Simulação variação da indutância ao longo da posição angular do rotor.	44
Figura 31 - Simulação do binário eletromagnético.	44
Figura 32 - Esboço da montagem laboratorial. 1 - Controlo; 2 - Fonte de alimentação e reóstato de carga de alta potência; 3 - Sensor de efeito de hall; 4 - Conversor de potência e máquina elétrica; 5 - Sensor de posição.	46
Figura 33 - Imagens da montagem. a) Circuito conversor de potência e sensores de hall; b) Circuitos de controlo; c) Osciloscópio e fonte de alimentação do circuito; d) montagem máquina de relutância; e) Controlo e medidor de potência (wattímetro); f) reóstato de carga de alta potência.	48
Figura 34 - Circuitos de controlo. 1 - Circuitos amplificadores com ganho de 0,1; 2 - Circuitos de disparo com conversor.	49
Figura 35 - Amplificador operacional TL084 JFET. a) Exterior do amplificador; b) Circuito representativo de cada conjunto de entradas e respetiva saída.	50
Figura 36 - Circuito amplificador com ganho 0.1.	51
Figura 37 - Circuito amplificador com ganho de 0.1.	52
Figura 38 - Comportamento da corrente nas diferentes fases da máquina - simulação motor.	56
Figura 39 - Comportamento da tensão nas diferentes fases da máquina - simulação motor.	57
Figura 40 - Comportamento da corrente e da tensão nas fases da máquina - simulação motor.	57
Figura 41 - Comportamento da corrente nas diferentes fases da máquina - ensaio motor.	58

Figura 42 - Comportamento da tensão nas diferentes fases da máquina - ensaio motor.....	59
Figura 43 - Comportamento da corrente e da tensão em uma das fases da máquina - ensaio motor. .	59
Figura 44 - Comportamento da corrente nas diferentes fases da máquina - simulação gerador 1500rpm.....	61
Figura 45 - Comportamento da tensão nas diferentes fases da máquina - simulação gerador 1500rpm.	62
Figura 46 - Comportamento da corrente e da tensão em uma das fases da máquina - simulação gerador 1500rpm.....	63
Figura 47 - Comportamento da corrente nas diferentes fases da máquina - ensaio gerador 1500rpm.	64
Figura 48 - Comportamento da tensão nas diferentes fases da máquina - ensaio gerador 1500rpm. ..	64
Figura 49 - Comportamento da corrente e da tensão em uma das fases da máquina - ensaio gerador 1500rpm.....	65
Figura 50 - Comportamento da corrente nas diferentes fases da máquina - simulação gerador 3000rpm.....	66
Figura 51 - Comportamento da tensão nas diferentes fases da máquina - simulação gerador 3000rpm.	67
Figura 52 - Comportamento da corrente e da tensão em uma das fases da máquina - simulação gerador 3000rpm.....	67
Figura 53 - Comportamento da corrente nas diferentes fases da máquina - ensaio gerador 3000rpm.	68
Figura 54 - Comportamento da tensão nas diferentes fases da máquina - ensaio gerador 3000rpm. ..	69
Figura 55 - Comportamento da corrente e da tensão em uma das fases da máquina - ensaio gerador 3000rpm.....	69

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Ângulos de controlo implementados na simulação - funcionamento gerador.	34
Tabela 2 - Ângulos de controlo implementados em laboratório - funcionamento motor.....	53
Tabela 3 - Ângulos de controlo implementados em laboratório - funcionamento gerador.	54
Tabela 4 - Valores de potência medidos - ensaio motor.	60
Tabela 5 - Valores de potência medidos - ensaio gerador 1500rpm.	66
Tabela 6 - Valores de potência medidos - ensaio gerador 3000rpm.	70

Lista de constantes e variáveis

L	Indutância
$\frac{dL}{d\theta}$	Variação da indutância
T_m	Binário
T_{max}	Binário máximo
L_{max}	Indutância máxima
w	Velocidade angular
α	Comprimento angular da saliência do rotor
θ	Posição angular do rotor da máquina
i_{ph}	Corrente de uma fase da máquina
N	Número de espiras de um enrolamento da máquina
μ_0	Permeabilidade do ar
R_r	Raio do rotor da máquina
l_m	Comprimento da máquina
g	Entreferro
CC	Corrente contínua
t_{off}	Tempo em que o transístor está desligado
t_{on}	Tempo em que o transístor está ligado
D	Duty cycle (ciclo de trabalho)
T_{ciclo}	Período do ciclo de funcionamento do conversor
φ	Fluxo magnético
J	Momento de inércia

f_{ciclo} Frequência do ciclo

Índice

Resumo	iii
Abstract.....	v
Agradecimentos	vii
Índice de Figuras.....	ix
Índice de Tabelas.....	xiii
Lista de constantes e variáveis	xv
1. Introdução.....	1
1.1. Motivação	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Estrutura da dissertação	2
2. Estado da Arte.....	5
2.1. Máquina de Relutância Variável	5
2.2. Eletrônica de Potência.....	10
2.2.1. Conversores	11
2.2.1.1. Conversores em ponte.....	12
i) Conversor assimétrico em meia ponte.....	12
ii) Conversor de enrolamento de fase compartilhado.....	13
iii) Conversor de comutador compartilhado.....	15
iv) Conversor síncrono em ponte completa.....	15
2.2.1.2. Conversores com reaproveitamento de energia - condensadores.....	16
i) Conversor C-Dump.....	17
ii) Conversor Sood.....	18
iii) Conversor Oulton	19
iv) Conversor Buck-Boost	20
2.2.1.3. Conversores com reaproveitamento de energia - enrolamentos.....	22
i) Conversor Bifilar	22
ii) Conversor de enrolamento de comutação auxiliar	23
2.2.1.4. Conversores dissipativos.....	25
i) Conversor R-Dump.....	25

2.2.1.5.	Conversores auto-comutáveis	26
i)	Conversor ressonante série	26
ii)	Conversor em meia ponte	27
3.	Modelo de simulação do gerador.....	29
3.1.	Ponto de funcionamento motor	29
3.2.	Ponto de funcionamento gerador.....	32
3.2.1.	Descrição do modelo	32
3.2.1.1.	Sensor de Posição	34
3.2.1.2.	Controlo	36
3.2.1.2.1.	Controlo de Corrente	37
3.2.1.2.2.	Conversor	39
3.2.1.3.	Fase da Máquina	40
3.2.1.3.1.	L fase ($dL/d\theta$).....	42
3.2.1.3.2.	Binário eletromagnético.....	44
4.	Desenvolvimento experimental	45
4.1.	Montagem.....	45
4.2.	Controlo	49
4.2.1.	Circuitos de controlo.....	49
4.2.1.1.	Circuito de aquisição de sinais	50
4.2.1.2.	Circuito de disparo	51
4.2.2.	Algoritmo de controlo.....	52
5.	Apresentação e análise de Resultados	55
5.1.	Motor.....	55
5.2.	Gerador.....	61
5.2.1.	Gerador - 1500rpm	61
5.2.2.	Gerador - 3000rpm	66
5.2.3.	Comparação de resultados: 1500rpm - 3000rpm	71
6.	Conclusões	73
6.1.	Perspetivas Futuras	74
	Referências	75
	Anexo A - Algoritmo de controlo de gerador MRC.....	79
	Anexo B - Algoritmo de controlo de motor MRC	91

1. Introdução

1.1. Motivação

As máquinas de relutância variável são caracterizadas pela sua elevada fiabilidade e simplicidade de construção. Deste modo, este tipo de máquina tem sido muito estudado e aplicado, sobretudo, como motor. No entanto, ao nível da geração de energia elétrica o estudo desta máquina não tem sido muito aprofundado, apesar de apresentar características muito interessantes a nível económico e funcional. Deste modo, este trabalho tem como objetivo apresentar um estudo e correspondente implementação desta máquina como geradora de energia. Neste âmbito foi criado um modelo genérico desta máquina de modo a estudar as suas características como gerador de energia elétrica. Para além disso foi implementado laboratorialmente o drive e correspondente controlo que permite utilizar esta máquina como geradora de energia elétrica. Para além disso vai ser também experimentado o funcionamento motor da máquina, cujos resultados vão ser comparados com os obtidos a partir do modelo já existente do mesmo.

1.2. Objetivos

Os objetivos propostos neste estudo são:

- Criar um modelo em MATLAB/SIMULINK de uma máquina de relutância que tenha comportamento como gerador;
- Experimentar o modelo acima referido para vários tipos de condições de funcionamento;
- Desenvolver laboratorialmente um conversor eletrónico de potência e respetivo controlo para atuar a máquina de relutância como gerador de energia elétrica;
- Validar os modelos com os resultados experimentais obtidos.

1.3. Estrutura da dissertação

Esta dissertação está dividida em 6 capítulos. Cada um deles será brevemente descrito nos seguintes pontos:

1. Introdução: é o presente capítulo;
2. Estado da arte: é onde se vai estudar o funcionamento teórico da máquina e os respetivos conversores eletrónicos de potência existentes para o efeito;
3. Modelo de simulação do gerador: neste capítulo é feita uma breve descrição do modelo motor previamente existente em Simulink e será feita uma descrição de todas as componentes do modelo gerador desenvolvido no âmbito desta tese também em Simulink;
4. Desenvolvimento experimental: aqui serão apresentados os diversos aspetos para o desenvolvimento de um protótipo laboratorial para utilizar a máquina como geradora de energia;

5. Apresentação e análise de Resultados: serão apresentados os resultados das simulações e dos ensaios experimentais do comportamento motor e gerador da máquina, fazendo-se uma comparação entre eles;
6. Conclusões: é feita uma análise sobre o trabalho desenvolvido e possíveis melhorias a serem implementadas futuramente.

2. Estado da Arte

Este capítulo está dividido em duas secções: máquina de relutância variável e conversores eletrônicos de potência. Na primeira, será feita uma descrição do que é uma máquina de relutância e serão mostradas as equações que traduzem o seu funcionamento; na segunda será feita uma descrição do funcionamento de vários tipos de conversores de potência, suas vantagens e desvantagens na utilização dos mesmos como acionamento de máquinas elétricas de relutância.

2.1. Máquina de Relutância Variável

As máquinas de relutância variável caracterizam-se pela sua construção simples e robusta, apresentando apenas enrolamentos no estator. Não são utilizados ímanes permanentes e o rotor é composto apenas por ferro com saliências, como é mostrado no exemplo da Figura 1 [1].

Caso se aplique uma corrente numa determinada fase da máquina, irão originar-se linhas de fluxo. Essas linhas de fluxo tendem a maximizar-se originando um binário que vai mover o rotor de forma a que as linhas de fluxo da fase excitada e a saliência do rotor mais próxima desta se alinhem [1].

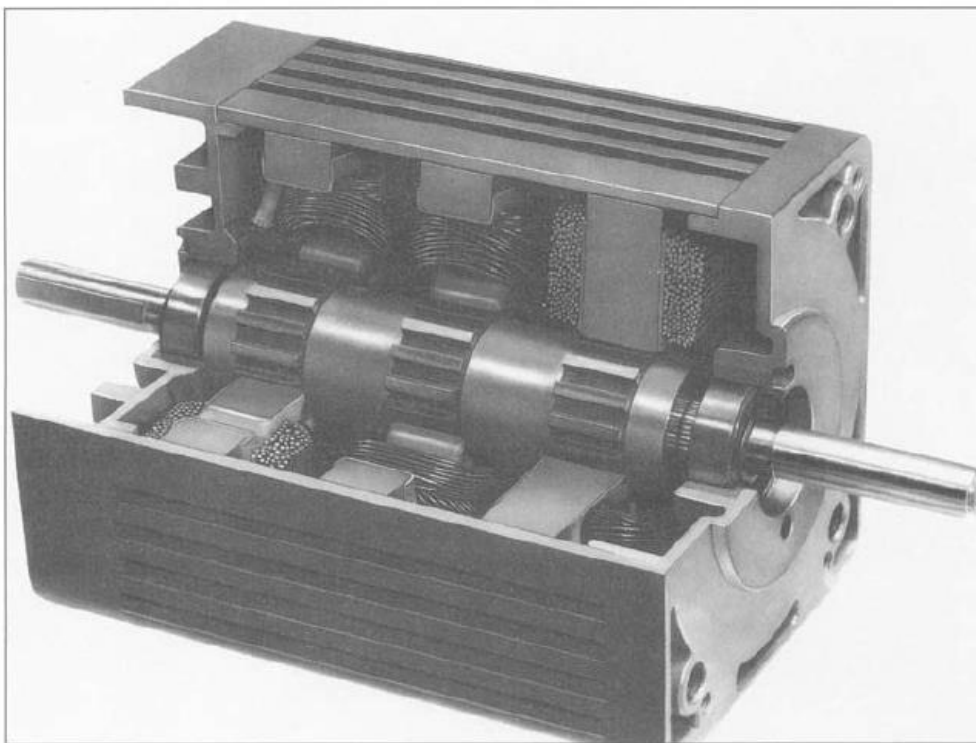
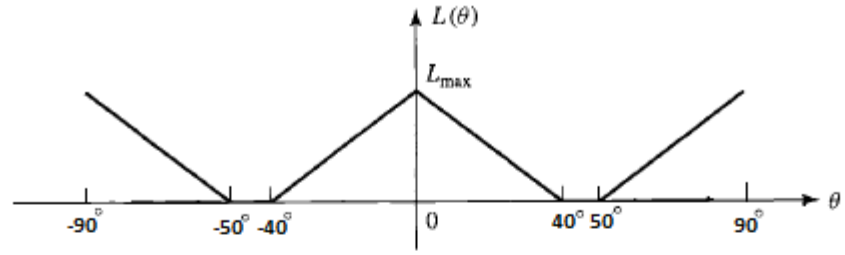


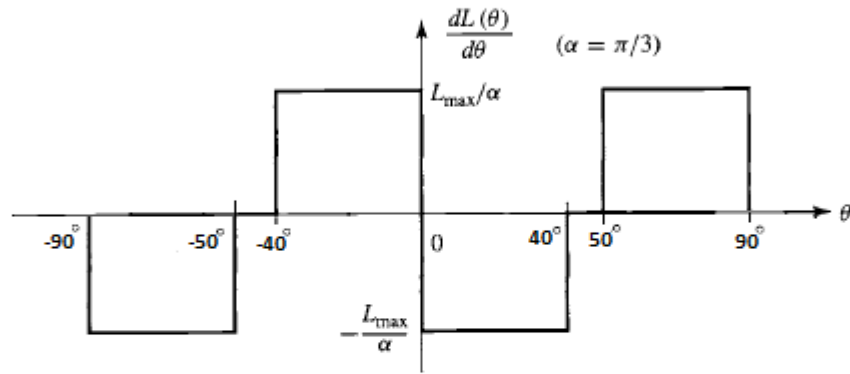
Figura 1 - Máquina de Relutância Variável [1].

Pelo facto de o funcionamento deste tipo de máquinas depender quase na totalidade da forma como os enrolamentos do estator são excitados, facilmente se conclui que esta possui características muito vantajosas tanto a nível de aproveitamento energético como económicas, podendo ser utilizada tanto em contextos de baixa como de alta velocidade. No entanto, estas máquinas têm processos de controlo complexos, sendo necessário conhecer continuamente a posição do rotor de forma a energizar corretamente cada uma das suas fases [1].

Para melhor compreender o funcionamento desta máquina é considerado o exemplo de uma máquina 6/4 (6 polos no estator e 4 no rotor) e trifásica representada esquematicamente na Figura 3 [1]. As formas de onda que descrevem o comportamento das respetivas indutâncias e binário, estão representadas na Figura 2 [1]. Considerou-se que a máquina apresenta um comportamento linear.

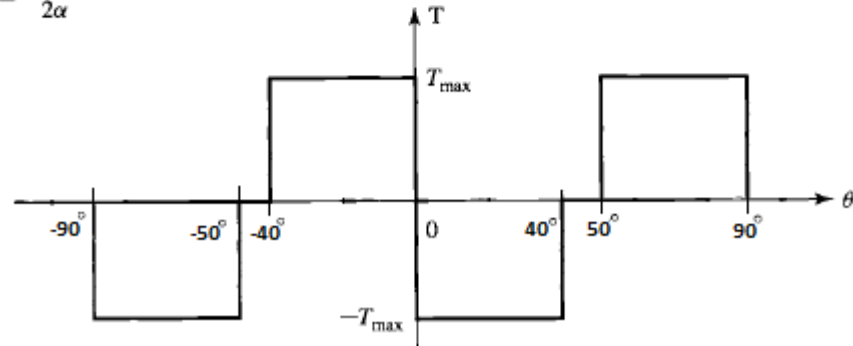


(a)



(b)

$$T_{\max} = \frac{L_{\max} i_{ph}^2}{2\alpha}$$



(c)

Figura 2 - Perfil: indutância (L) (a); variação da indutância ($\frac{dL}{d\theta}$) (b); binário (T_m) da fase da máquina em função da posição do rotor (c). T_{\max} representa o valor máximo do binário, L_{\max} representa o valor máximo de indutância, α é comprimento angular de uma saliência do rotor, i_{ph} é a corrente na fase da máquina, θ é a posição angular do rotor [1].

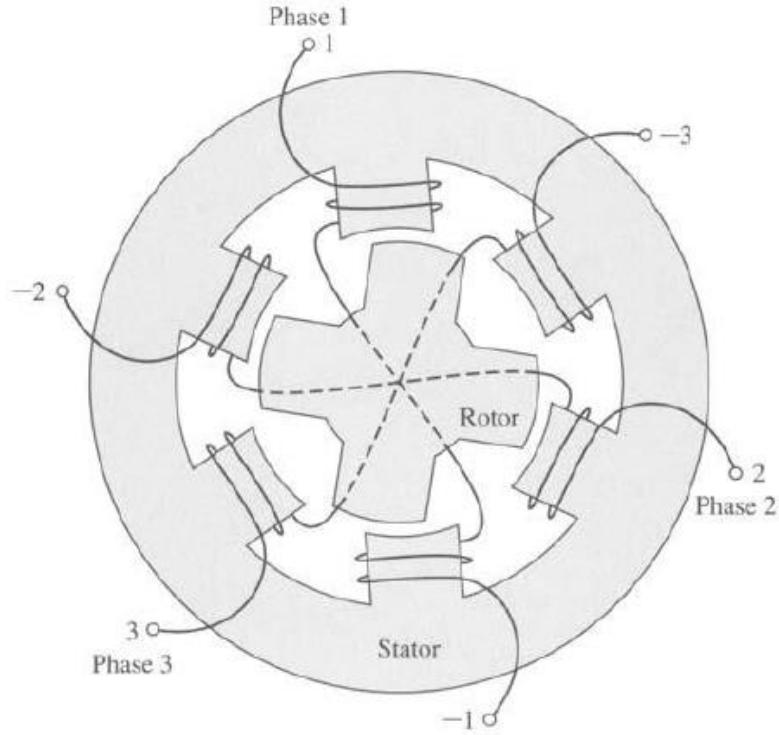


Figura 3 - Corte transversal Máquina de Relutância 6/4 [1].

Considerando que a máquina tem um comportamento linear, $\frac{dL}{d\theta}$ (variação da indutância) é constante e pode calcular-se através de (1) [1].

$$\frac{dL}{d\theta} = \frac{L_{max}}{\alpha} \quad (1)$$

L_{max} pode ser obtido por (2), onde N é o número de espiras do enrolamento, μ_0 é a permeabilidade do ar, R_r é o raio do rotor, l_m é o comprimento da máquina e g é o comprimento do entreferro.

$$L_{\max} = \frac{N^2 \mu_0 \alpha R_r I_m}{2g} \quad (2)$$

Integrando o valor da tensão de excitação do enrolamento obtém-se o valor do fluxo magnético (φ) criado no mesmo. Assim, sabendo φ e L , que varia linearmente com θ , pode calcular-se i_{ph} pela expressão (3) [1].

$$i_{ph} = \frac{L}{\varphi} \quad (3)$$

Sabendo i_{ph} e $\frac{dL}{d\theta}$, pode obter-se o binário resultante do funcionamento da máquina (T_m) por (4). O binário máximo (T_{\max}) pode ser obtido pela expressão (5) [1].

$$T_m = \frac{1}{2} i_{ph}^2 \frac{dL}{d\theta} \quad (4)$$

$$T_{\max} = \frac{L_{\max}}{2\alpha} i_{ph}^2 \quad (5)$$

Obtido o binário e sabendo o momento de inércia (J), que depende dos parâmetros de construção da máquina, é possível obter-se a velocidade angular (w) (6) [1].

$$w = \frac{T_m}{J} \quad (6)$$

As expressões matemáticas apresentadas anteriormente descrevem o funcionamento geral da máquina de relutância variável. No entanto, esta apresenta dois modos de funcionamento: motor e gerador. Para melhor compreensão considere-se o perfil de indutância presente na Figura 2 [1]. Quando os enrolamentos da

máquina são excitados no período em que a indutância apresenta uma variação positiva $\left(+\frac{dL}{d\theta}\right)$, esta vai funcionar como motor, apresenta um binário eletromagnético positivo. Pelo contrário, quando os enrolamentos são excitados no período em que a máquina apresenta uma variação negativa do valor da indutância $\left(-\frac{dL}{d\theta}\right)$ esta funciona como gerador e o valor do binário eletromagnético é negativo.

2.2. Eletrônica de Potência

Os conversores eletrônicos de potência são essenciais para a sustentabilidade energética, sendo responsáveis por vários processos relacionados com o armazenamento, eficiência e aproveitamento de energia. Para que estes processos ocorram, são necessários dispositivos de interface entre a fonte elétrica e a carga (Figura 4 [2]), pois, na maior parte dos casos existem incompatibilidades entre ambas, como por exemplo diferenças na amplitude da tensão, da corrente e até no número de fases. Assim é deduzível que estes conversores são essenciais para o funcionamento da máquina em estudo. Relativamente ao estudo aqui apresentado, existem diversos tipos topologias que podem ser utilizadas. Assim, nos subcapítulos seguintes serão apresentadas diversas topologias de conversores utilizados em eletrônica de potência bem como as respectivas vantagens e desvantagens na sua utilização.

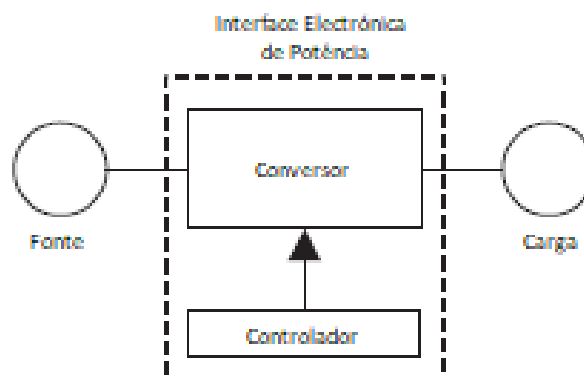


Figura 4 - Interface Eletrônica de Potência [2].

2.2.1. Conversores

Um conversor de potência é um sistema eletrônico que tem como função realizar a interface entre sistemas energéticos. Por vezes uma fonte não possui as características de tensão e corrente adequadas para alimentar diretamente uma carga e é aqui que estes conversores têm um papel decisivo, permitindo que se criem meios para que ocorram trocas energéticas reguladas entre estes. Os tipos de conversores que serão descritos são:

- Conversores em ponte;
- Conversores com reaproveitamento de energia - condensadores;
- Conversores com reaproveitamento de energia - enrolamentos;
- Conversores dissipativos;
- Conversores auto-comutáveis.

Os diferentes tipos de conversores de potência apresentam semelhanças no seu funcionamento. Funcionam por ciclos definidos por um período que se divide entre $t_{on}(DT_{ciclo})$ e $t_{off}((1 - D)T_{ciclo})$, consoante o estado do transístor (On ou Off), onde T_{ciclo} ($T_{ciclo} = \frac{1}{f_{ciclo}}$) é o período do ciclo completo e D é o duty cycle (ciclo de trabalho) que é descrito pela expressão $(D = \frac{t_{on}}{T_{ciclo}})$ [3] [4].

Daqui em diante, na maior parte das descrições, serão mencionados 3 modos de funcionamento: magnetização, desmagnetização e roda-livre. Considere-se:

- Modo magnetização: quando sobre os enrolamentos de determinada fase da máquina flui corrente, energizando os mesmos;
- Modo desmagnetização: quando deixa de fluir corrente para o enrolamento de determinada fase da máquina, o que faz com que o valor energético no mesmo diminua;
- Modo roda-livre: diodo de roda-livre é um diodo que, devido às características do circuito, tem como função evitar que a tensão sobre determinada carga sofra uma alteração de polarização brusca. Quando ocorre este tipo de circulação no circuito do conversor diz-se que está a operar em modo roda-livre.

2.2.1.1. Conversores em ponte

Os conversores em ponte apresentam 4 topologias principais, que são: conversor assimétrico em meia ponte, conversor de enrolamento de fase compartilhada, conversor de comutador compartilhado e conversor síncrono em ponte completa.

i) Conversor assimétrico em meia ponte

Este conversor é o mais utilizado em máquinas de relutância. Como se pode ver na Figura 5 [5], apresenta dois transístores por fase e tem três modos de funcionamento: magnetização, desmagnetização e roda-livre.

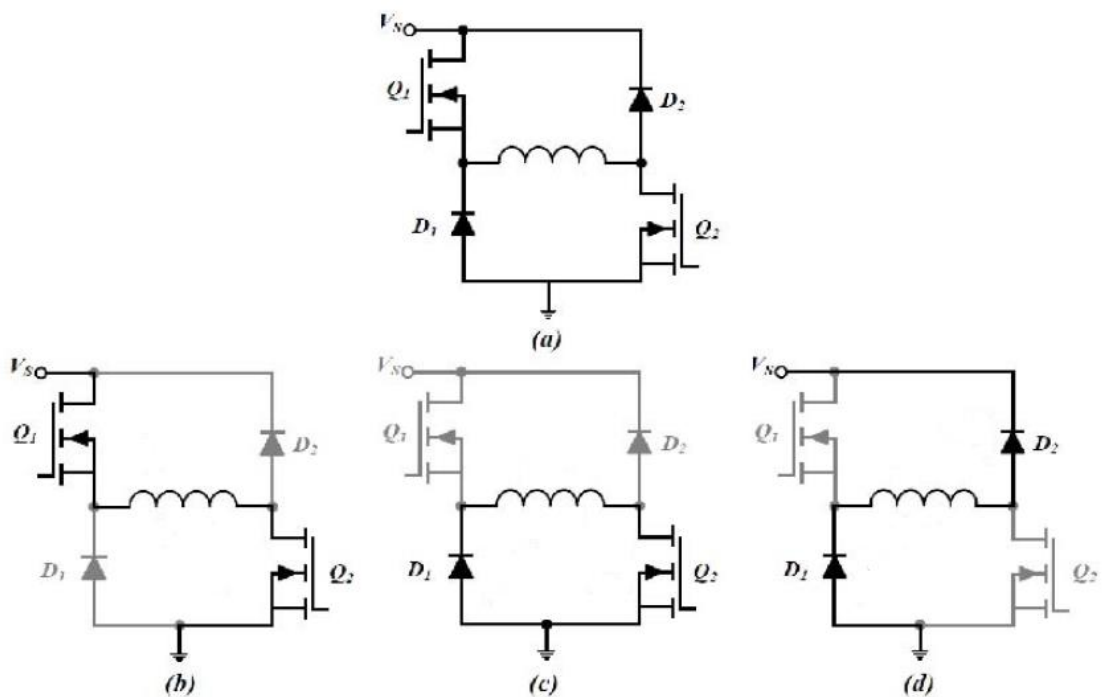


Figura 5 - Conversor assimétrico em meia ponte. (a) Topologia do conversor; (b) magnetização; (c) roda-livre; (d) desmagnetização [5].

Como se verifica na Figura 5, em (b) os transístores Q_1 e Q_2 estão ativos. Assim, a corrente flui pelo enrolamento da fase da máquina energizando-o. Em (c) apenas o transistor Q_2 está ativo o que vai fazer com que a corrente proveniente do enrolamento flua pelo diodo D_1 evitando-se assim uma alteração brusca da polarização da tensão sentida pela fase. Em (d) ocorre a desmagnetização do enrolamento, que devolve a corrente à fonte.

As principais vantagens deste conversor são [5] [6] [7]:

- A possibilidade de controlar de forma independente cada um dos transístores de cada fase;
- Qualquer que seja o sentido da corrente a performance do circuito mantém-se inalterada;
- Consegue fazer um rápido aumento de corrente numa determinada fase da máquina pois os seus componentes têm capacidade para tolerar a aplicação de valores de tensão elevados.

As suas principais desvantagens são [5] [6] [7]:

- Se a desmagnetização ocorrer enquanto a máquina funciona como gerador podem ocorrer perdas energéticas significativas através dos díodos devido à queda de tensão por eles imposta;
- Necessidade de um condensador de grande capacidade junto à fonte de tensão de alimentação para filtrar as harmónicas associadas aos processos de magnetização e desmagnetização das fases da máquina.

ii) Conversor de enrolamento de fase compartilhado

Alterando o conversor assimétrico de meia ponte de modo a permitir que dois enrolamentos de diferentes fases sejam compartilhados resulta no conversor de enrolamento de fase compartilhado. A sua topologia encontra-se representada na Figura 6 (a) [5]. Cada uma das duas fase possui um tiristor que é responsável por deixar a corrente fluir pelo respetivo enrolamento. Assim, existe um controlo independente sobre o comportamento de cada uma das fases da máquina [5]. Como o controlo é feito pelos tiristores, o anterior número de transístores e

díodos utilizados para controlar uma fase é o necessário para agora controlar duas, daí a designação de enrolamento de fase compartilhado.

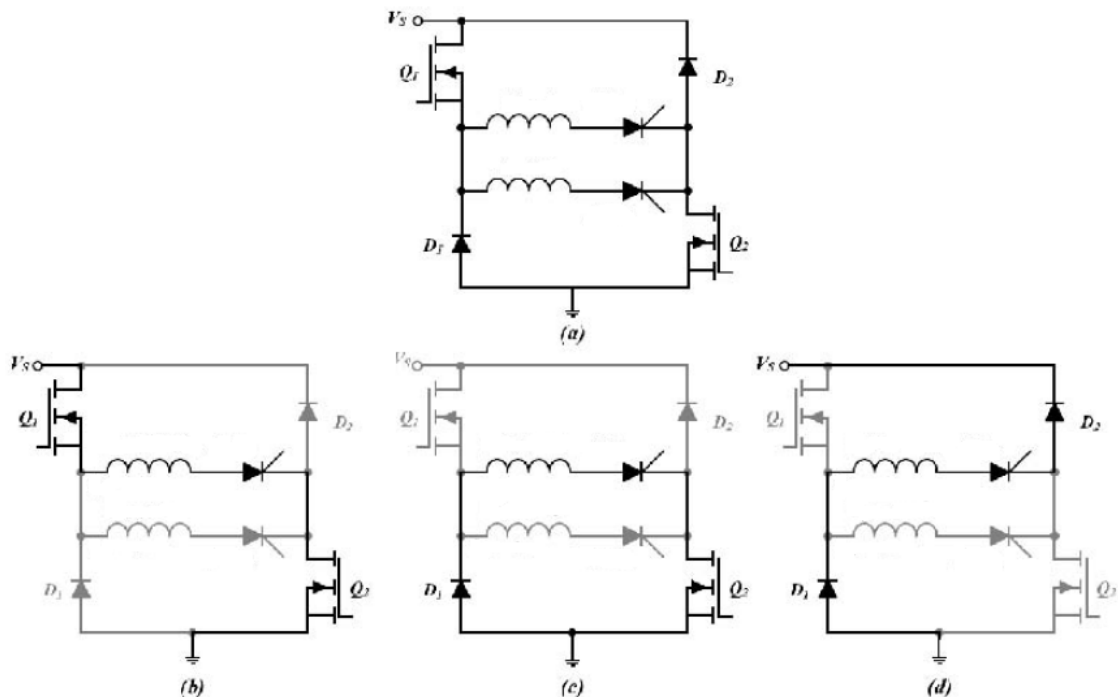


Figura 6 - Conversor de enrolamento de fase compartilhado. (a) Topologia do conversor; (b) magnetização; (c) roda-livre; (d) desmagnetização [5].

As principais vantagens deste conversor são [5]:

- O número de transístores e díodos utilizados diminui comparativamente a outros tipos de conversores;
- O conversor é capaz de fornecer tensão positiva, negativa e nula, o que permite uma grande flexibilidade no controlo da corrente;
- É possível um controlo independente de corrente de cada fase.

As principais desvantagens são [5]:

- A utilização do tiristor causa perdas significativas;
- O tiristor necessita de circuitos auxiliares para o seu controlo. Isto aumenta o custo do conversor.

iii) Conversor de comutador compartilhado

No conversor de comutador compartilhado, também conhecido como conversor Miller, os transístores e os díodos são partilhados por diferentes enrolamentos de diferentes fases. A Figura 7 [5] ilustra um exemplo desta topologia com quatro fases.

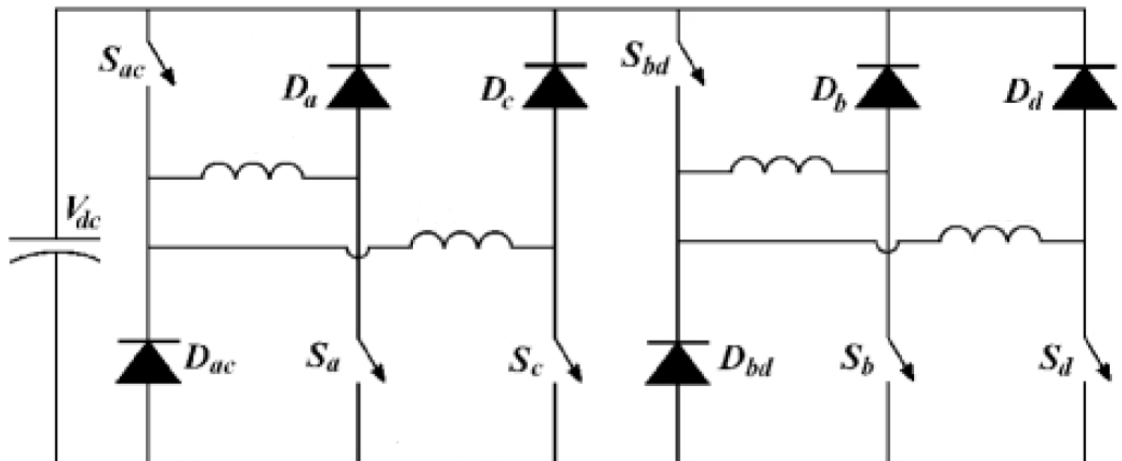


Figura 7 - Conversor de comutador compartilhado [5].

As principais vantagens deste conversor são [5]:

- Redução do número de componentes de eletrônica de potência necessários, o que resulta na diminuição do custo do conversor;

As principais desvantagens são [5]:

- A liberdade de operação da máquina é limitada no sentido em que para alterar a direção do seu movimento o valor da velocidade de referência deve ser zero e só de seguida é que se pode inverter a direção do movimento;
- Deve garantir-se que a indutância mútua entre fases não crie forças eletromotrizes que causem circulação indesejada de corrente.

iv) Conversor síncrono em ponte completa

Este conversor reduz as perdas por condução e comutação durante os modos de funcionamento de desmagnetização e roda-livre pois substitui os convencionais díodos por transístores, como é possível verificar na Figura 8 [5].

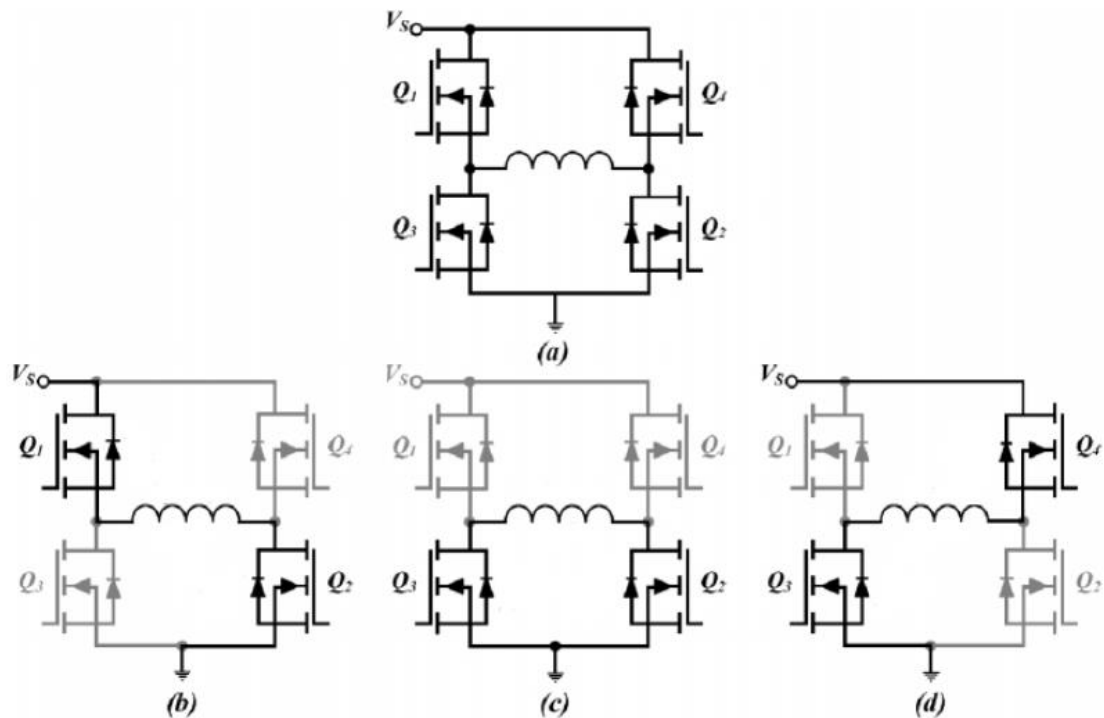


Figura 8 - Conversor síncrono em ponte completa. (a) Topologia do conversor; (b) magnetização; (c) roda-livre; (d) desmagnetização [5].

As vantagens deste conversor são [5]:

- É muito flexível tanto em funcionamento motor como gerador;
- Oferece uma boa eficiência energética durante o modo de roda-livre e desmagnetização.

A principal desvantagem é [5]:

- Como há mais transístores, deve ter-se em conta o custo adicional dos circuitos de controlo dos mesmos.

2.2.1.2. Conversores com reaproveitamento de energia - condensadores

Os conversores descritos neste ponto reaproveitam energia utilizando condensadores para armazenar a energia proveniente da desmagnetização de um enrolamento de uma determinada fase da máquina. Posteriormente, os mesmos

condensadores irão descarregar-se criando uma elevação no valor da tensão no circuito, funcionando assim como uma fonte de tensão auxiliar. Serão descritos 4 conversores deste tipo: conversor C-Dump, conversor Sood, conversor dividido de corrente contínua e conversor Buck-Boost.

i) Conversor C-Dump

Olhando para a topologia deste conversor (Figura 9 [7]), assume-se que T_1 está ligado. Isto vai fazer com que o enrolamento A seja energizado. Quando a corrente i_a excede o valor de referência, T_1 é desligado, o que deixa o diodo D_1 polarizado de forma a conduzir corrente, corrente que vai dirigir-se para o condensador C_d carregando-o. Ligando T_r , a energia armazenada em C_d vai ser transferida para a fonte (U) através de L_r . A tensão em C_d é regulada de forma a manter-se com o dobro do valor da tensão na fonte (U) para que a desmagnetização da fase seja mais rápida [7].

A maior vantagem deste conversor é [5] [7]:

- Capacidade de controlo individual sobre cada uma das fases da máquina.

As maiores desvantagens que este conversor apresenta são [5] [7]:

- O valor da tensão correspondente à diferença entre a tensão no condensador e a tensão da fonte, é limitada;
- O circuito de recuperação de energia apresenta perdas, causando diminuição da eficiência do sistema.

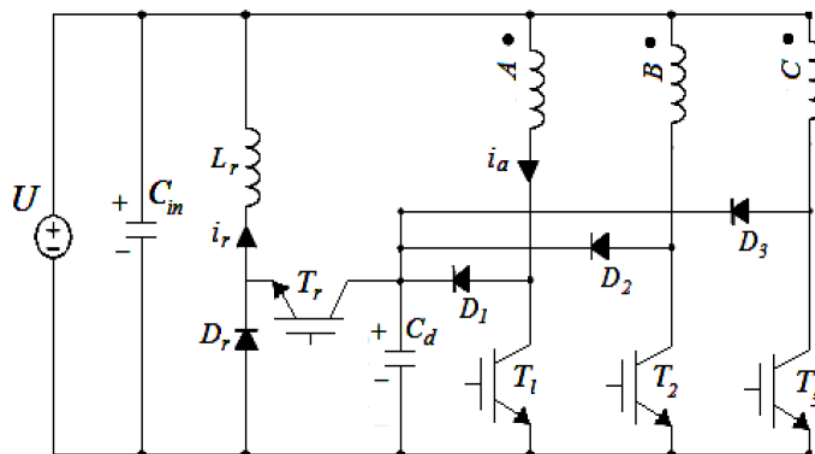


Figura 9 - Topologia conversor C-Dump [7].

ii) Conversor Sood

A configuração do conversor Sood é semelhante à do C-Dump mas tem modos de funcionamento diferentes, como é possível ver na Figura 10 [5]. Tem como particularidade o aumento da tensão no enrolamento de determinada fase à custa de um condensador.

Olhando para a Figura 10 é possível verificar que o conversor possui 4 modos de funcionamento (b), (c), (d) e (e). Em (b) o enrolamento da fase é energizado através da fonte de tensão pois Q_2 está ativo; em (c) Q_1 é ativo, o que vai fazer com que C_b eleve a tensão no enrolamento da fase; em (d) verifica-se que apenas Q_1 está ativo, ocorrendo assim a desmagnetização do enrolamento da fase através de D_1 e D_2 ; em (e), desativando Q_1 e Q_2 , a energia proveniente do enrolamento da fase vai circular pelo diodo D_2 e carregar o condensador C_b .

As principais vantagens deste conversor são [5]:

- O reduzido número de componentes;
- Os quatro possíveis estados de funcionamento permitem uma maior liberdade de controlo sobre o funcionamento da máquina.

As principais desvantagens são [5]:

- O controlo necessário para implementar os quatro modos de funcionamento é complexo;
- Há perdas de energia através do circuito de reaproveitamento de energia.

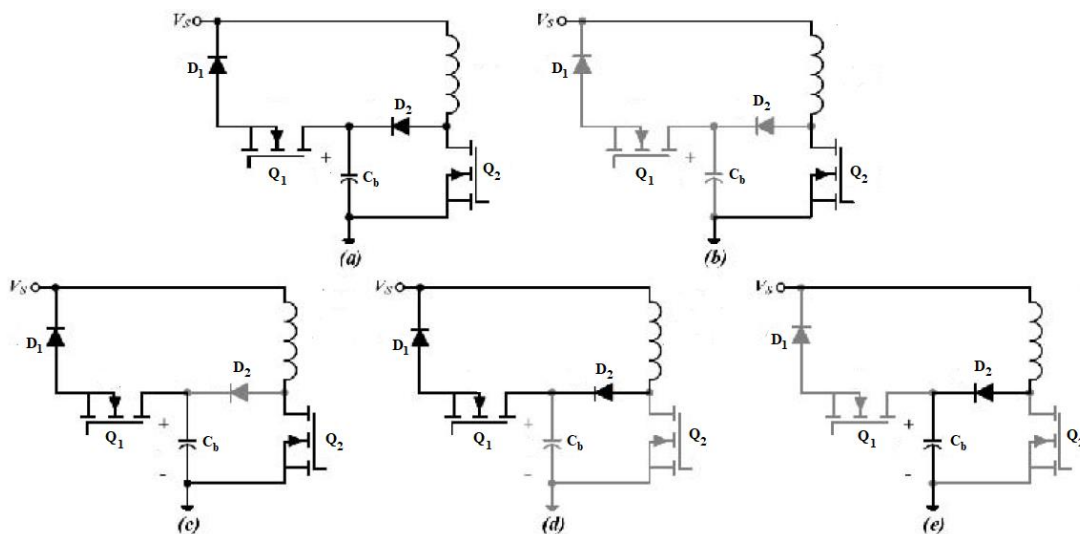


Figura 10 - Conversor Sood. (a) Topologia do conversor, (b) magnetização, (c) elevação da tensão no enrolamento da fase pelo condensador, (d) desmagnetização através dos díodos D_1 e D_2 , (e) desmagnetização através de D_2 e carregamento do condensador C_b [5].

iii) Conversor Oulton

Este conversor é constituído por dois condensadores ligados em série, como é possível verificar na Figura 11 [5] e apresenta dois modos de funcionamento: magnetização e desmagnetização.

Analisando a Figura 11 (b) o transistor Q_1 está ativo e o diodo D_1 apresenta polarização inversa, fazendo com que a corrente flua pelo enrolamento e a tensão em C_1 seja aplicada sobre a fase. Na mesma figura em (c), quando Q_1 é desativado, a corrente do enrolamento percorre D_1 e a tensão em C_2 é aplicada no enrolamento, fazendo com que o valor da corrente na fase diminua. O fluxo de energia dos dois condensadores deve ser balanceado para que a tensão entre ambos se mantenha equilibrada [6].

A principal vantagem que este conversor apresenta é [5] [6]:

- Tem capacidade para funcionar apenas com um transistor por fase, não existindo a necessidade de adicionar componentes e não comprometendo a flexibilidade do controlo e eficiência.

As desvantagens deste conversor são [5] [6]:

- A construção da máquina precisa de corresponder a certos parâmetros relativamente ao número de fases (tem de ser número par) para que exista um balanço de cargas nos condensadores. Este balanço vai também originar algumas perdas;
- A velocidade máxima da máquina como motor é reduzida pois a tensão aplicada a cada fase vai ser reduzida a metade.

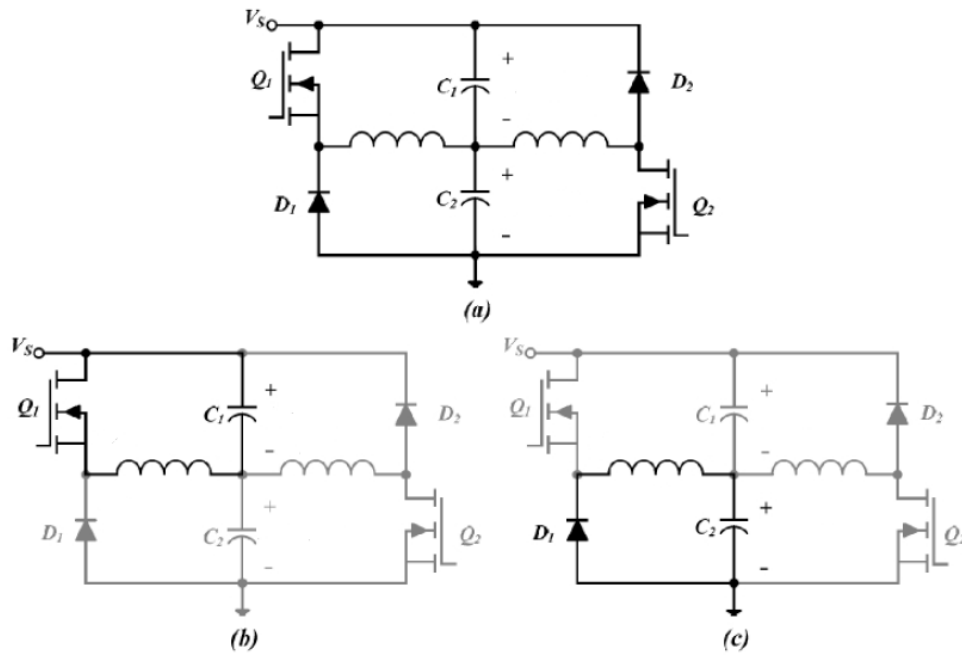


Figura 11 - Conversor Oulton. (a) Topologia do conversor, (b) magnetização, (c) desmagnetização [5].

iv) Conversor Buck-Boost

A estrutura deste conversor apresenta dois condensadores que fazem com que as tensões de magnetização e desmagnetização sejam separadas. Assim a flexibilidade do controlo da máquina aumenta [5]. Na Figura 12 [5] é possível ver a topologia deste conversor bem como os seus modos de funcionamento.

Quando o transístor Q_b está ativo, vai haver circulação de corrente pela indutância L_r (L_r pertence ao circuito do conversor). Essa mesma corrente vai fluir para o condensador C_b e para o enrolamento da fase da máquina. Desligando Q_b e ligando Q_a , o condensador C_b vai descarregar, criando um aumento de tensão sobre o enrolamento da fase. Desligando Q_a o enrolamento da fase irá desmagnetizar-se, a corrente irá fluir através de D_1 e o condensador C_i será carregado. Conforme o ajuste da frequência de trabalho dos transístores, é possível variar a carga com que cada um dos condensadores é carregado, o que faz com que estes possam atuar como fontes de tensão variáveis dentro do circuito.

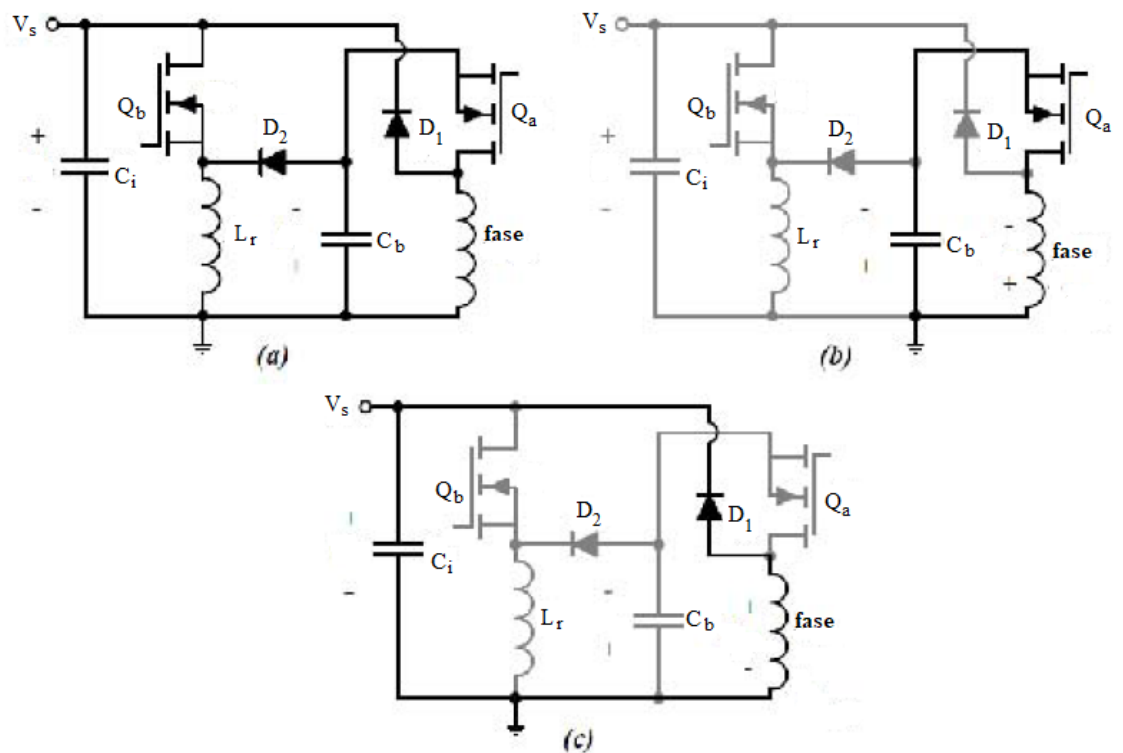


Figura 12 - Conversor Buck-Boost. (a) Topologia do conversor, (b) magnetização, (c) desmagnetização [5].

As principais vantagens deste conversor são [5]:

- A topologia do Buck-Boost permite que a tensão do circuito seja superior à tensão da fonte. Isto vai forçar a corrente a fluir mais rapidamente para o enrolamento da fase da máquina. Este processo é especialmente útil quando a máquina opera como gerador;
- Mesmo que exista só um transistor por cada uma das fases da máquina, é possível controlar cada uma delas sem existir qualquer tipo de dependência entre si.

As principais desvantagens são [5]:

- A complexidade do circuito;
- São necessários transístores que suportem valores de tensão elevados.

2.2.1.3. Conversores com reaproveitamento de energia - enrolamentos

Este tipo de conversores, à semelhança dos apresentados no ponto 2.2.1.2., explora o reaproveitamento da energia que resulta da desmagnetização dos enrolamentos das fases da máquina (primário) mas, neste caso, este processo é feito à custa de um segundo enrolamento (secundário) acoplado a cada uma das fases.

i) Conversor Bifilar

Este tipo de conversor usa um transistor e um diodo por fase e requer que a máquina utilize um enrolamento primário e um secundário acoplados muito perto um do outro para que exista reaproveitamento da energia magnética do primário. Na Figura 13 pode observar-se a topologia deste conversor [5].

Ativando o transistor Q_1 o primário vai ser magnetizado. Considerando um controlo de corrente, quando a corrente no primário ultrapassa o valor de referência, Q_1 é desligado. Quando isto acontece, a força eletromotriz induzida nos enrolamentos vai fazer com que D_1 entre em condução e, consequentemente, a corrente percorra o secundário e seja devolvida à fonte [8].

As vantagens deste conversor são [5] [6] [8]:

- O número de componentes utilizados é pequeno;
- As perdas por comutação são minimizadas;
- Controlo de corrente independente por fase.

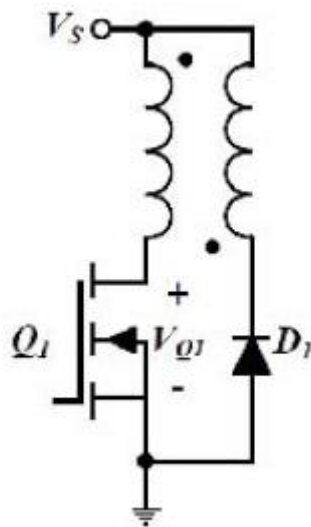


Figura 13 - Topologia Conversor Bifilar [5].

As desvantagens são [5]:

- Para motores grandes o sistema de enrolamentos bifilar não é económico;
- Como a tensão imposta ao transístor para que este mude de estado depende do rácio entre o número de enrolamentos do primário relativamente ao secundário, esta vai ser maior, o que vai provocar perdas maiores;
- Como o acoplamento não é perfeito, são necessários circuitos de amortecimento para lidar com tensões transitórias, o que faz aumentar o custo e a complexidade do conversor.

ii) Conversor de enrolamento de comutação auxiliar

Este conversor requer que a máquina possua enrolamentos auxiliares e possui quatro modos de funcionamento: magnetização do enrolamento da fase, roda-livre, magnetização do enrolamento auxiliar e desmagnetização do enrolamento principal. Os 3 primeiros modos de funcionamento referidos são descritos na Figura 14 [5].

Este conversor é um assimétrico em meia ponte, com diferença no aproveitamento da energia magnética do enrolamento principal, utilizando-se para esse efeito um enrolamento auxiliar. Quando os transístores são desativados, a

tensão inverte a polaridade o que faz com que a corrente se desloque em sentido inverso. Quando isto acontece, a corrente flui para o enrolamento auxiliar já que este está conectado ao principal. Como a função do auxiliar é alimentar a fase seguinte de forma a criar uma elevação rápida da corrente na mesma, o fluxo de corrente proveniente da fase anterior tem de ser cortado para que o auxiliar participe no processo de alimentação da fase seguinte. Caso a fase anterior ainda não tenha desmagnetizado totalmente, vai ter de o fazer pelo método convencional já descrito.

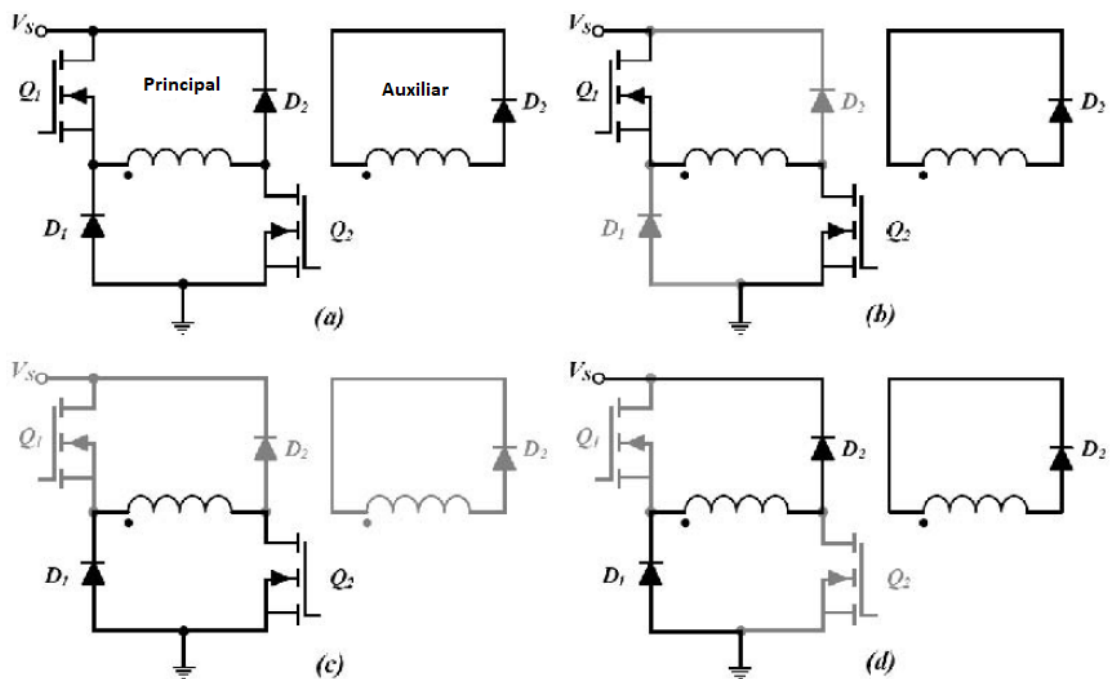


Figura 14 - Conversor de enrolamento de comutação auxiliar. (a) Topologia do conversor, (b) magnetização do enrolamento da fase, (c) roda-livre, (d) magnetização do enrolamento auxiliar [5].

As principais vantagens deste conversor são [5]:

- O desempenho do sistema aumenta com o reaproveitamento energético verificado à custa da magnetização do enrolamento auxiliar;
- A corrente pode fluir mais rapidamente no enrolamento da fase à custa da energia magnética armazenada no enrolamento auxiliar;

A principal desvantagem é [5]:

- O custo acrescido da construção da máquina provocado pelo enrolamento auxiliar.

2.2.1.4. Conversores dissipativos

Estes conversores não reaproveitam a energia magnética armazenada nos enrolamentos das fases da máquina, dissipando-a através de uma resistência. Embora não seja um conversor com grande eficiência, este facto pode ser ultrapassado devido à sua simplicidade e ao seu custo reduzido. A topologia mais utilizada neste tipo de conversores é a R-dump [5].

i) Conversor R-Dump

Como é possível ver na Figura 15 [5], este conversor apresenta um diódo e um transístor por fase e opera em dois modos: magnetização e desmagnetização. Durante o modo de desmagnetização, a energia é dissipada através de uma resistência (R_d , Figura 15) [5] [7].

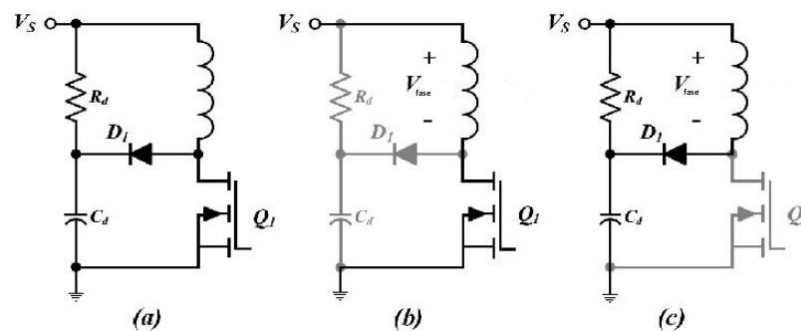


Figura 15 - Conversor R-dump. (a) Topologia do conversor, (b) magnetização, (c) desmagnetização [5].

As principais vantagens são [5] [6]:

- Baixo custo e estrutura simples;
- Apenas os circuitos de atuação sobre o transístor necessitam de estar ligados à massa, diminuindo-se assim o custo do conversor;

A principal desvantagem é [5] [6]:

- Pouco prático para aplicações de alta potência devido à sua característica dissipativa que cria implicações na eficiência do circuito.

2.2.1.5. Conversores auto-comutáveis

Este tipo de conversores utiliza várias técnicas para realizar as comutações entre fases, no entanto aqui vão ser mostradas duas das mais utilizadas topologias: o conversor ressonante série e o conversor em meia ponte.

i) Conversor ressonante série

Devido às suas características ressonantes, os transístores deste conversor apenas comutam quando o valor da tensão é 0V [6]. A Figura 16 [5] representa a topologia deste conversor e os seus modos de funcionamento.

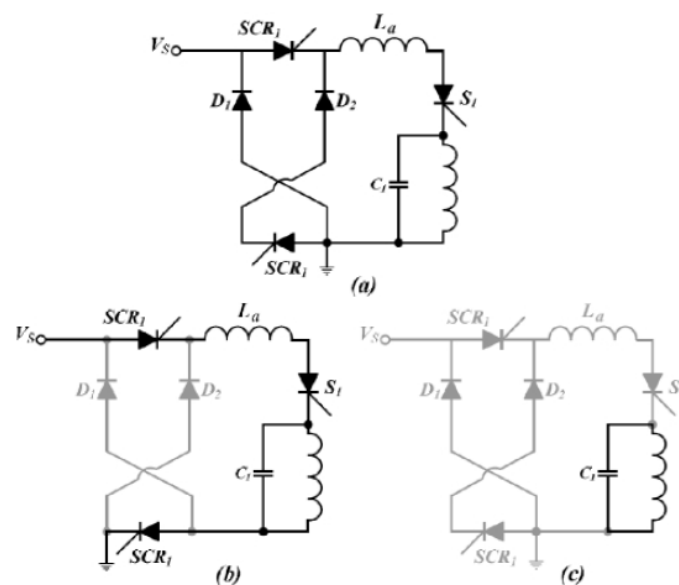


Figura 16 - Conversor ressonante série. (a) Topologia do conversor, (b) magnetização, (c) desmagnetização [5].

A principal vantagem deste conversor é [5] [6]:

- O transístor sofre menos desgaste devido à característica de comutação a 0V e, conseqüentemente, as perdas por comutação diminuem.

A principal desvantagem é [5] [6]:

- O custo do circuito é maior devido ao grande número de componentes.

ii) Conversor em meia ponte

Neste conversor em pelo menos duas das fases deve sempre circular corrente. Há três modos de operação explícitos em 5 estados, como é possível ver na Figura 17 (adaptada de [5]), que vão depender do como como os transístores são ativados ou desativados.

Analisando a Figura 17, no estado 1 ph_1 e ph_3 vão ser magnetizados. No estado 2 ph_2 vai ser magnetizado e a corrente vai circular para ph_3 , visto que D_3 está a conduzir. Isto vai fazer com que o circuito funcione em roda-livre. No estado 3 verifica-se a desmagnetização do circuito através de D_1 e D_3 . O estado 4 apresenta o mesmo funcionamento que o estado 2 e o estado 5 tem o mesmo funcionamento que o estado 3 com diferenças nas fases em que o processo ocorre, como se pode verificar na Figura 17.

A principal vantagem desta topologia é [5]:

- Os componentes do conversor são reduzidos visto que são apenas necessários um diodo e um transístor por fase.

As principais desvantagens são [5]:

- Não é possível controlar apenas uma fase independentemente das outras;
- Esta topologia apenas é utilizada para máquinas que tenham na sua construção séries de 4 fases.

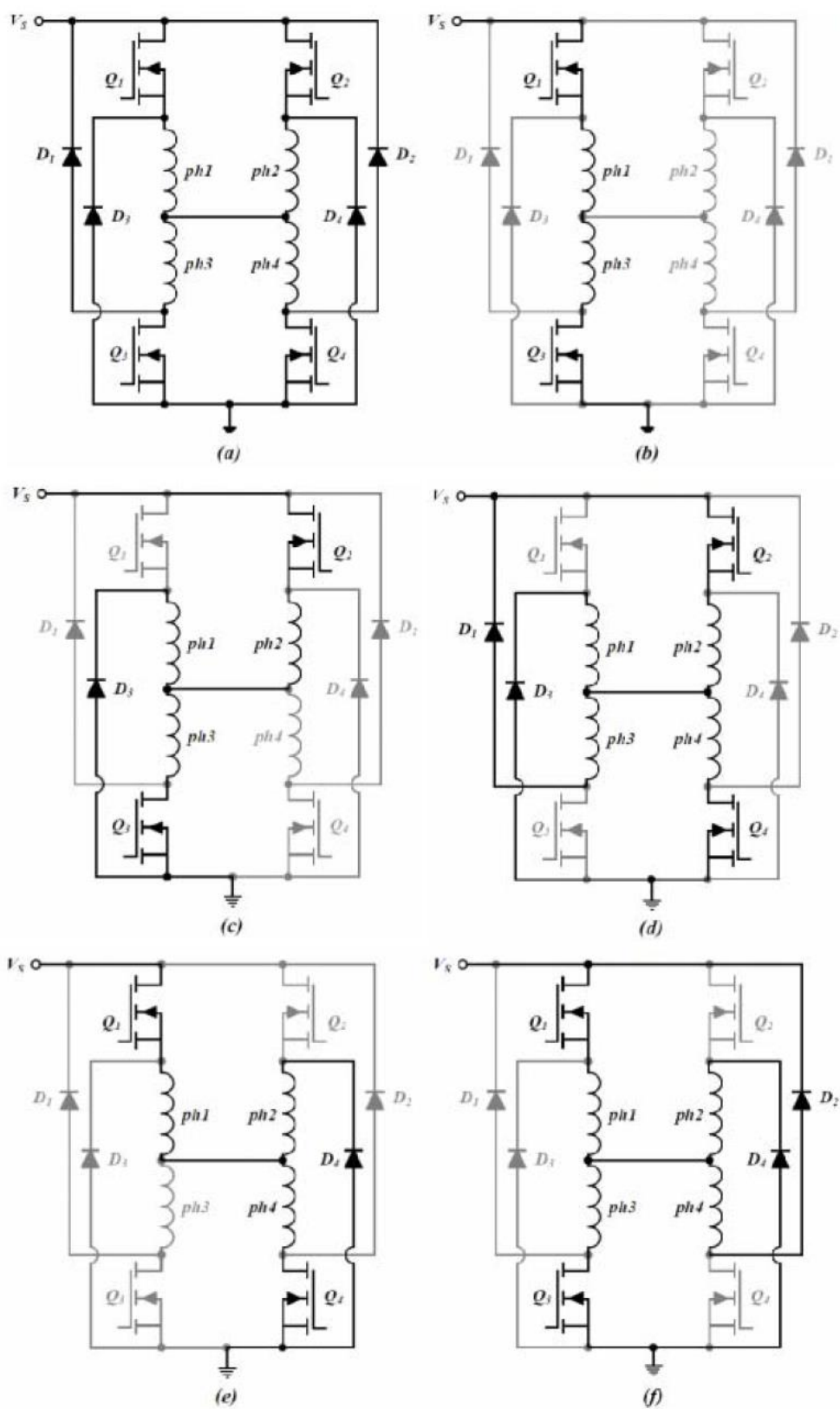


Figura 17 - Conversor em meia ponte. (a) Topologia do conversor, (b) (c) (d) (e) (f) estados de funcionamento 1, 2, 3, 4 e 5, respectivamente [5].

3. Modelo de simulação do gerador

3.1. Ponto de funcionamento motor

Para melhor se compreender o funcionamento da máquina de relutância, será apresentado o seu modelo motor no ambiente de simulação Matlab/Simulink da MathWorks. [9][10][11]. Como o modelo não foi desenvolvido no âmbito deste trabalho, neste capítulo apenas será feita uma breve descrição do seu funcionamento.

Tal como referido anteriormente, para se acionar uma máquina de relutância é necessário um conversor eletrónico de potência. Na Figura 19 é possível verificar as 3 partes principais do modelo utilizado para a simulação da máquina:

- Bloco Regulator (8/6), que é responsável por interpretar informação e emitir sinais. Observando a constituição deste bloco na Figura 18, pode verificar-se que é este o responsável pelo controlo de corrente. Através de um sensor de posição (explicação mais detalhada do seu funcionamento no ponto 3.2.1.1. deste trabalho), é verificado se a posição angular do rotor se encontra dentro dos limites pretendidos. Caso isto se verifique, é efetuado o controlo de corrente relativamente a uma corrente de referência pré-definida. Este controlo de corrente vai transmitir ao conversor se este deve ou não impor tensão sobre os enrolamentos de determinada fase da máquina;

- Bloco Four phases CONVERTER, que recebe os sinais do Regulator. Este, tendo em conta a sua topologia (neste trabalho é utilizado o conversor assimétrico em meia ponte) e os sinais que recebe, controla a forma como a tensão é aplicada aos enrolamentos de cada uma das fases da máquina [11]. Dependendo do sinal recebido do controlo de corrente, os transístores correspondentes a determinada fase da máquina vão ser ativos ou não. Se forem ativos o conversor impõe um valor de tensão sobre os enrolamentos, magnetizando-os. Caso contrário, os enrolamentos da fase irão desmagnetizar-se;
- Bloco Switched Reluctance Motor (8/6 75 KW preset) que tem como função simular o comportamento da máquina sob as condições impostas pelo conversor eletrónico de potência [10]. Aqui serão interpretados valores de tensão que chegam do bloco CONVERTER e recorrendo a cálculos matemáticos (fórmulas descritas no capítulo 2.1 deste trabalho) serão devolvidos valores que representam as grandezas associadas aos enrolamentos das diferentes fases da máquina (corrente, fluxo magnético, binário eletromagnético e velocidade, como é possível ver na Figura 19).

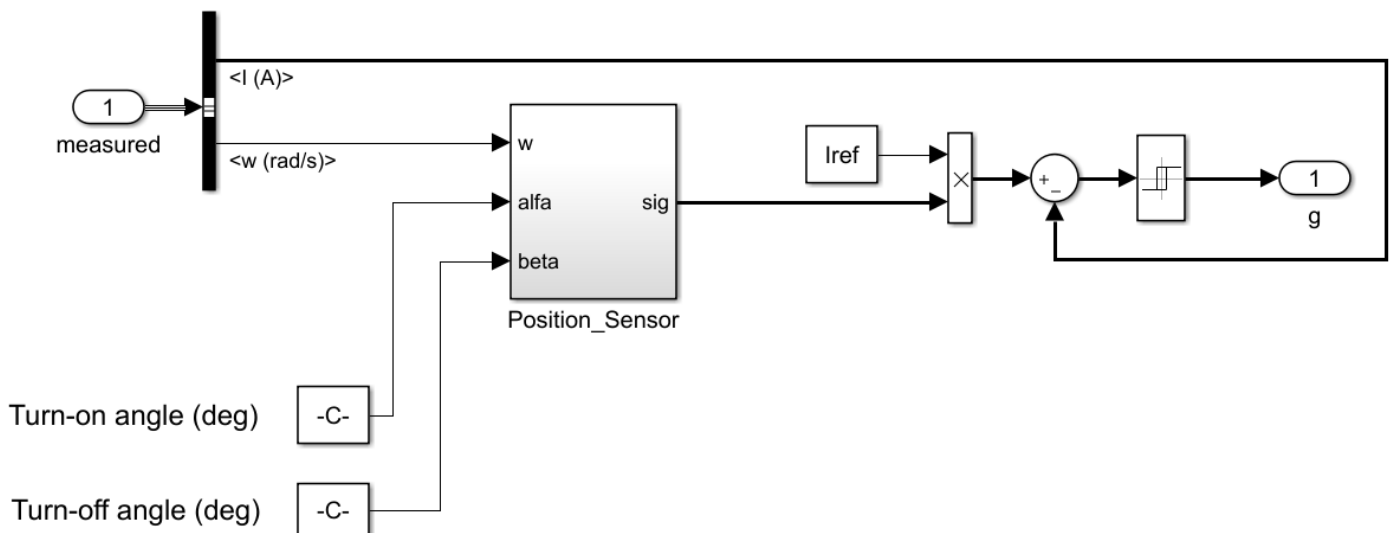


Figura 18 - Bloco Regulator (8/6) do modelo motor Simulink.

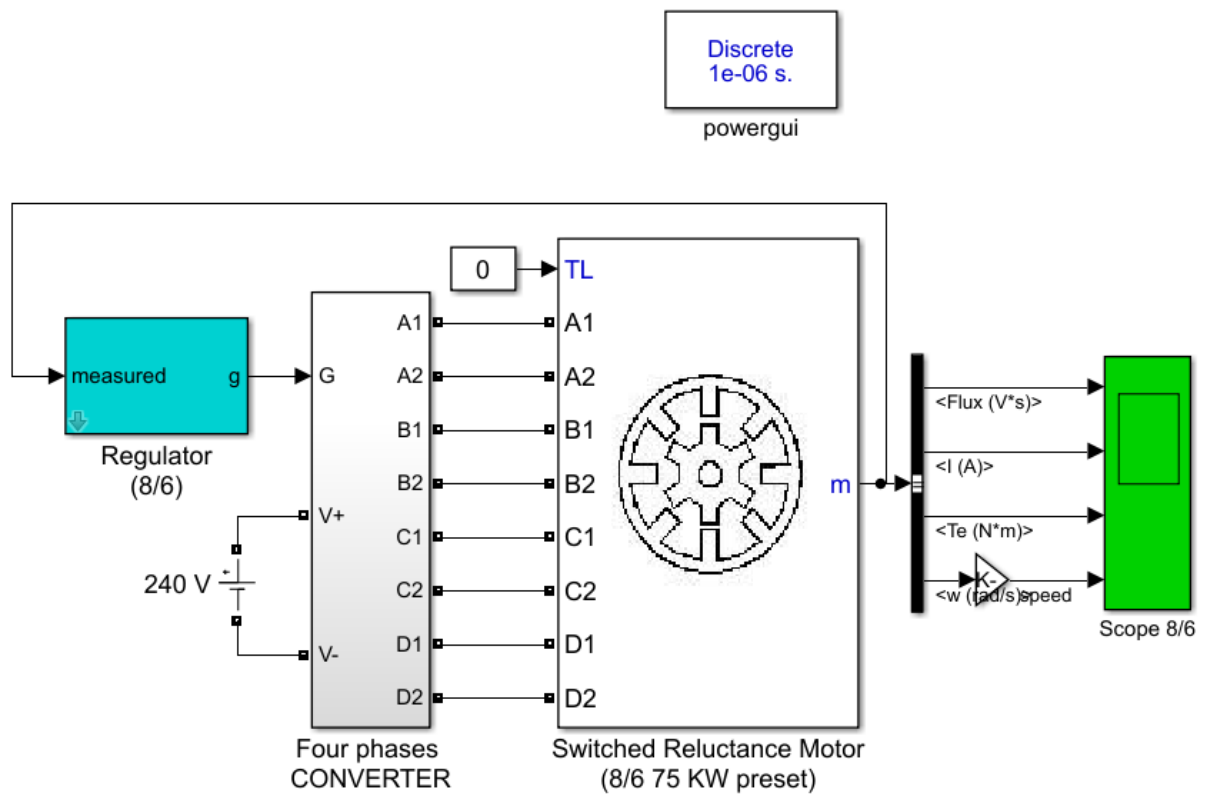


Figura 19 - Modelo motor Simulink.

3.2. Ponto de funcionamento gerador

De forma a estudar o comportamento da máquina de relutância no modo de gerador e comparar com resultados práticos foi criado um modelo em ambiente Matlab/Simulink. O modelo foi desenvolvido para a máquina de relutância 8/6 presente em laboratório. Assim, neste capítulo serão descritos o modelo e o seu funcionamento, sendo que os resultados do mesmo serão apresentados e discutidos posteriormente no capítulo 5.

3.2.1. Descrição do modelo

Como é possível verificar na Figura 20 o modelo da máquina em estudo como gerador está dividido em blocos, cada um com uma função específica. O Sensor de Posição determina o valor da posição angular do rotor. Este valor vai influenciar diretamente a forma como o conversor vai funcionar e, consequentemente, a forma como a tensão é imposta aos terminais dos enrolamentos de cada uma das fases. Cada fase está definida entre determinados intervalos previamente programados e, caso a posição angular do rotor se verifique dentro dos limites de um destes intervalos, será enviado um sinal para o bloco Controlo a

indicar que, caso se pretenda, se pode aplicar tensão na fase compreendida no intervalo indicado.

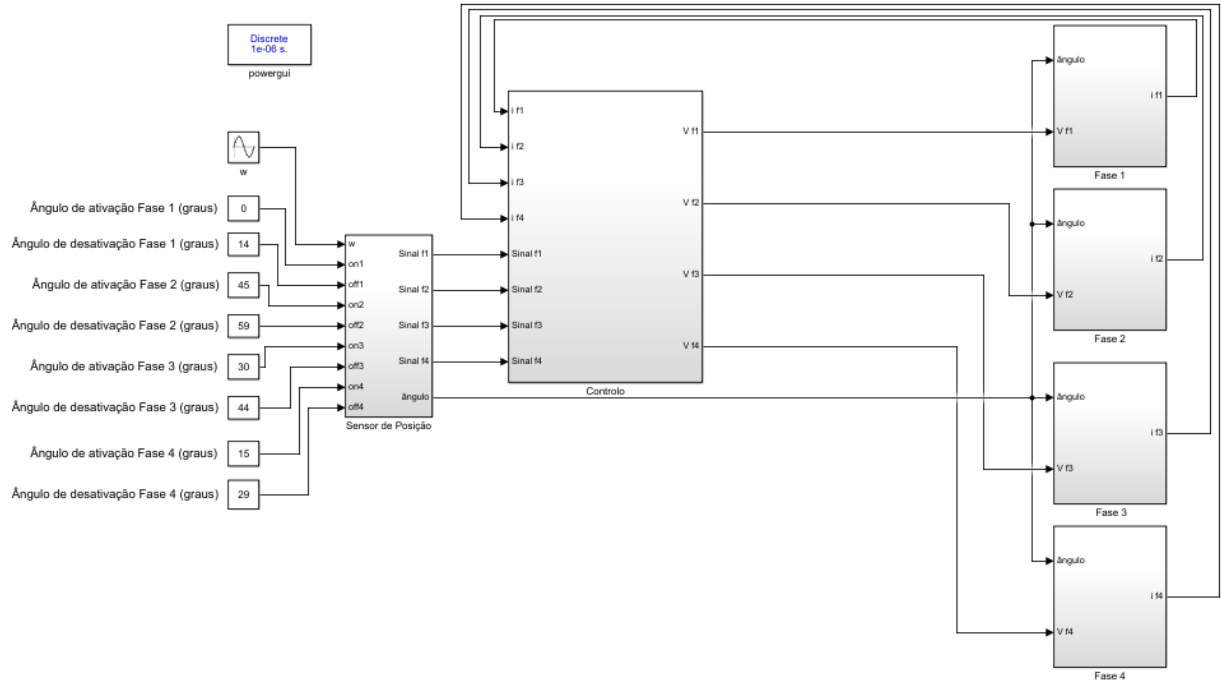


Figura 20 - Simulação de uma máquina de relutância com 4 fases (gerador).

Ainda dentro do bloco Controlo, é simulado o controlo histerético de corrente [12] imposto à máquina. De cada um dos blocos que representam cada uma das fases da máquina vai resultar um valor que representa a corrente resultante da imposição da tensão efetuada pelo conversor sobre os enrolamentos das diferentes fases. Este valor de corrente é interpretado e reencaminhado para o Controlo que vai encarregar-se de o manter dentro dos limites definidos na histerese, recorrendo à alteração da polaridade da tensão aplicada. Dentro dos blocos que representam as fases da máquina, para além de se obter o valor da corrente resultante, obtém-se o valor do binário eletromagnético. Cada um dos blocos será descrito com mais detalhe nos próximos pontos deste capítulo.

3.2.1.1. Sensor de Posição

Na Figura 23 está representada a simulação do sensor de posição. É a partir deste que são gerados os sinais que vão permitir a magnetização e desmagnetização dos enrolamentos de cada uma das fases da máquina [13]. A partir do valor da velocidade determina-se uma posição angular em graus. Consoante esse valor estiver dentro ou fora dos limites definidos pelas variáveis *ON* e *OFF* de cada uma das fases, as variáveis de saída (Sinal fx) irão assumir o valor 1 ou 0, o que irá influenciar o controlo de corrente, como será visto no ponto 3.2.1.2.1.. Os limites definidos para a simulação podem ser consultados na Tabela 1 e são estes que vão definir o perfil de indutância presente na Figura 22.

Tabela 1 - Ângulos de controlo implementados na simulação - funcionamento gerador.

	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 4
θ_{on}	0	30	15	45
θ_{off}	15	45	30	60

Tendo em conta que a máquina tem 8 polos no estator e 6 no rotor, até que o rotor percorra uma volta de 360° , um polo do estator irá ver passar por si 6 polos diferentes do rotor. Daí que o intervalo de indutâncias definido e mostrado na Figura 22 seja $60^\circ \left(\frac{360}{6}\right)$ [14]. Ter conhecimento sobre esta estrutura angular da máquina é extremamente importante para o controlo da mesma e é aqui que o sensor de posição tem um papel de relevo, pois é ele que interpreta a posição angular do rotor e informa o controlo de que os limites de determinada fase se verificam ou não [15] [16]. Fazendo uma analogia entre a Figura 21 e a Figura 22, na Figura 21 é possível ver que um polo do rotor se encontra alinhado com o polo do estator que representa a fase 1. Isto representa o ponto 0° (ou 60°) do eixo Variação da posição do rotor em graus ($^\circ$), onde o valor da indutância da fase 1 é máximo. Isto significa que a posição que o sensor de posição dá está diretamente relacionado com o valor da indutância sendo que esta última, como como foi

referido no capítulo 2.1 (3), está diretamente relacionado com o valor da corrente que circula no enrolamento da fase.

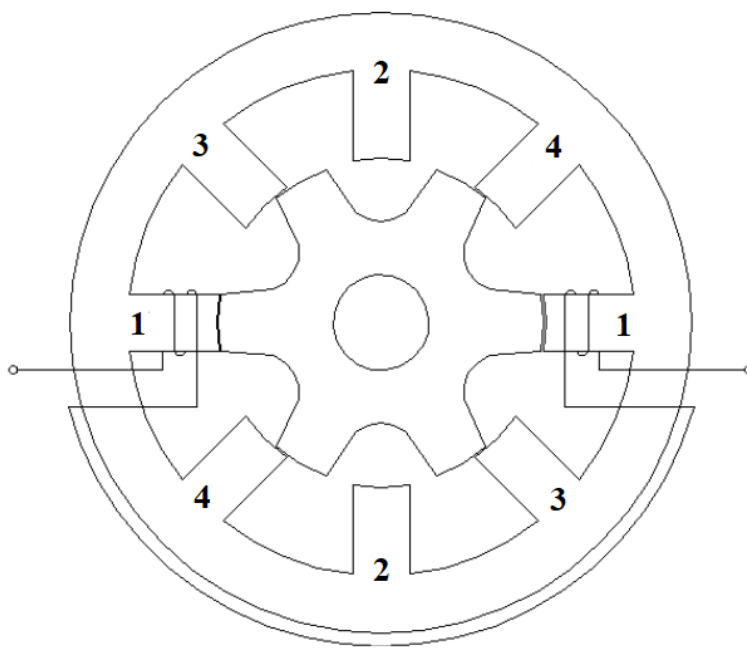


Figura 21 - Corte transversal da máquina de relutância 8/6.

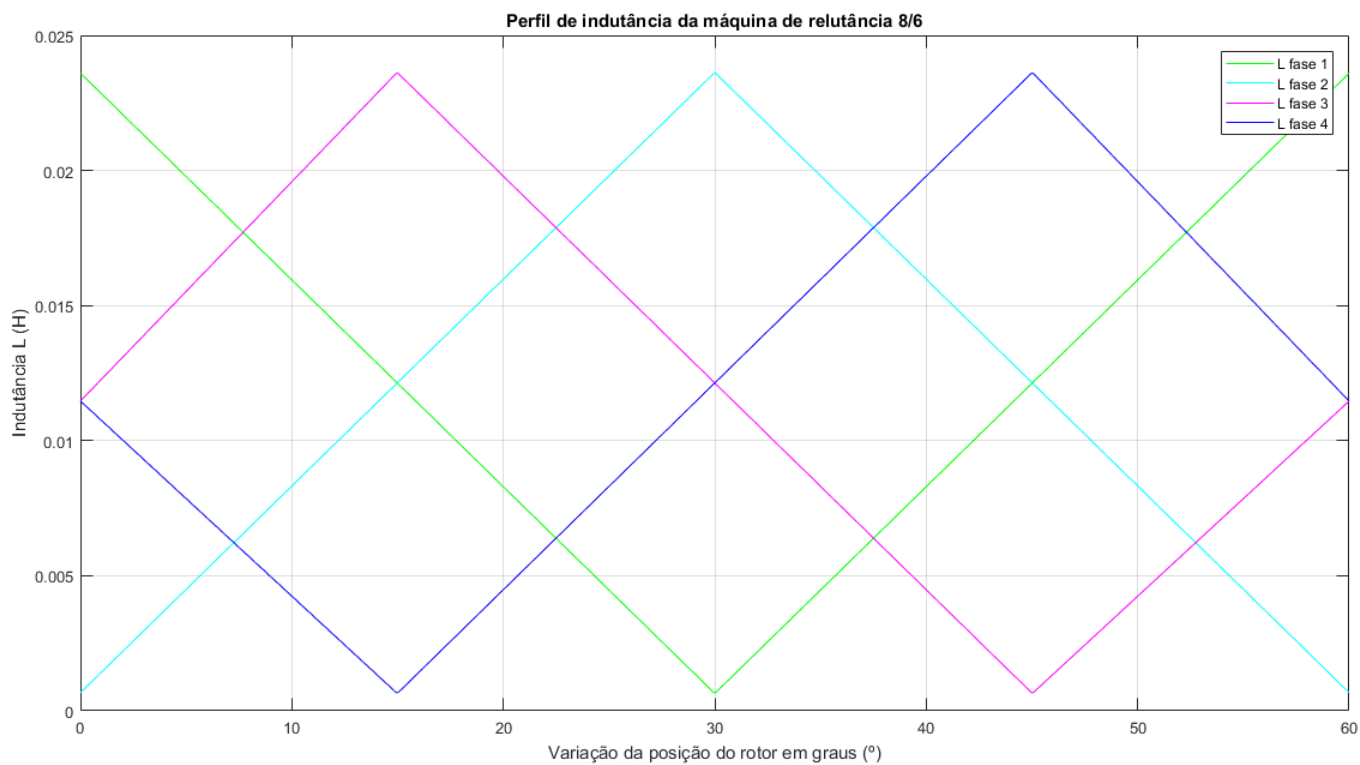


Figura 22 - Perfil de indutância da máquina de relutância 8/6.

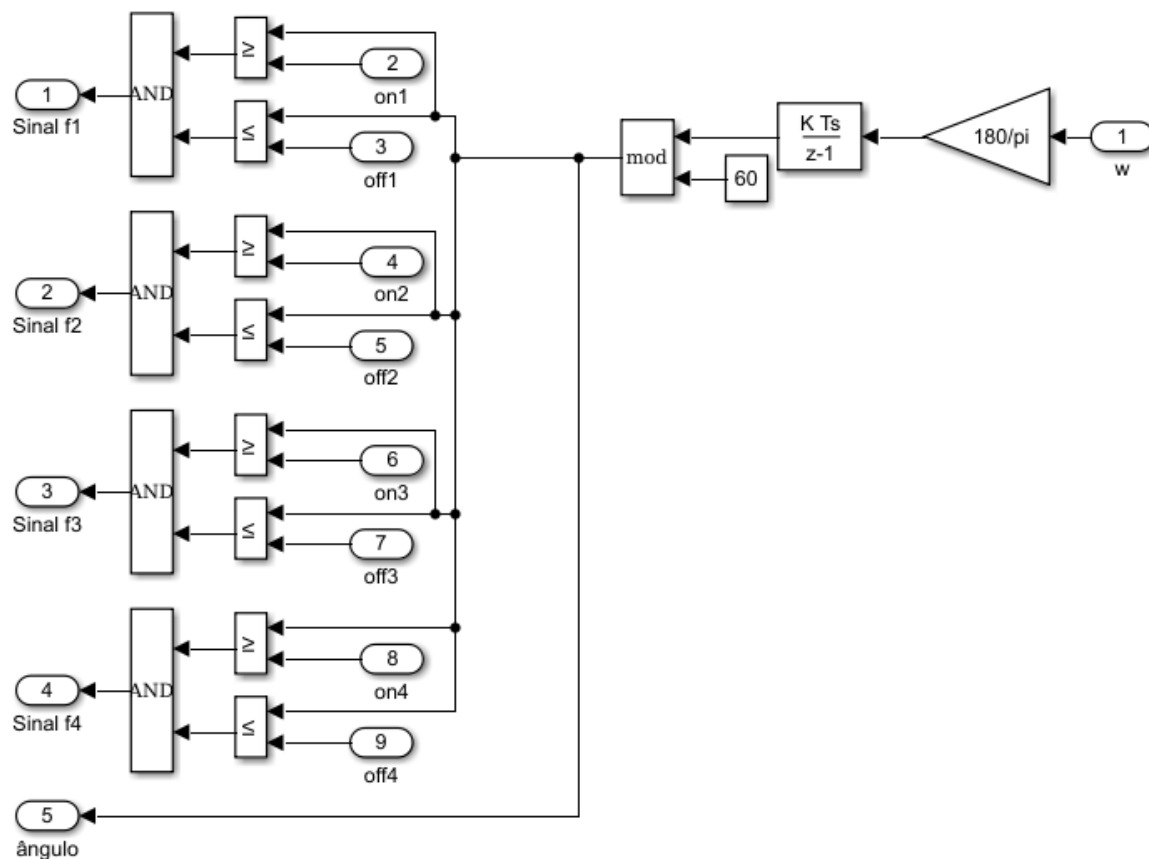


Figura 23 - Simulação Sensor de Posição do rotor da máquina de relutância 8/6.

3.2.1.2. Controlo

O controlo é o bloco responsável pela forma como a tensão é imposta aos enrolamentos da máquina. Na Figura 24 apresenta-se o bloco do controlo que irá gerar os sinais de comando do conversor de potência. O controlo da máquina será efetuado através do controlo das suas correntes estatóricas.

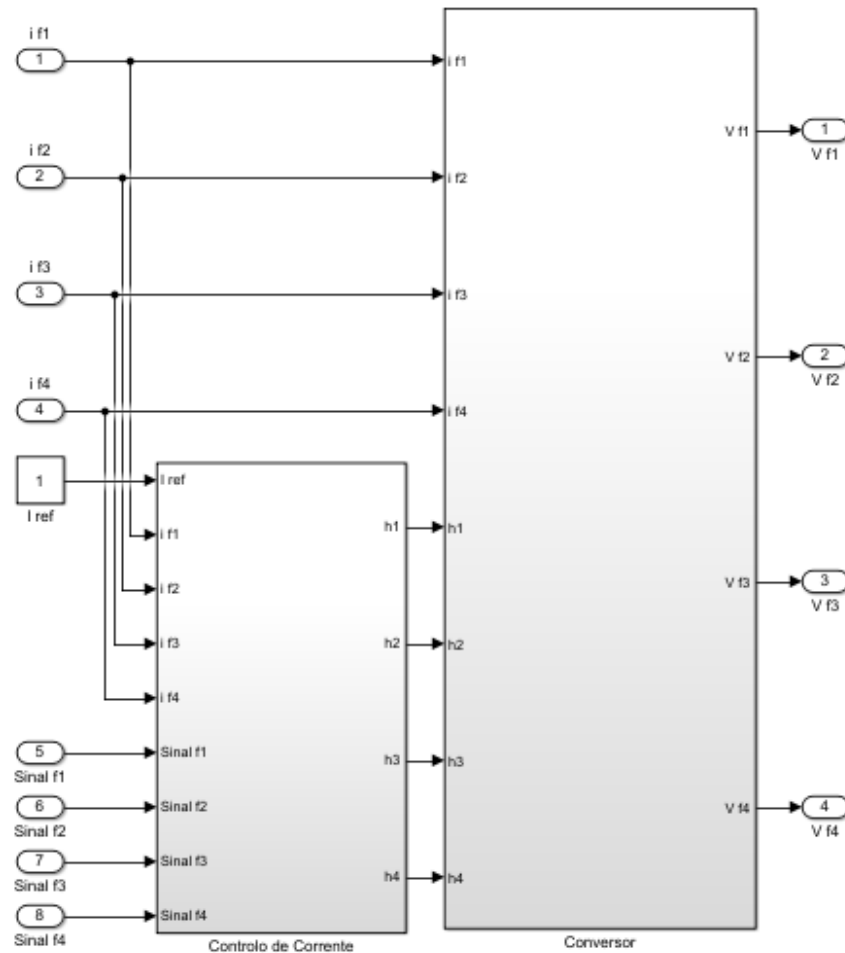


Figura 24 - Simulação Controlo (vista geral).

3.2.1.2.1. Controlo de Corrente

Para se efetuar o controlo de corrente é necessária a leitura dos valores de corrente em cada uma das fases da máquina em tempo real para que, conjugando esta informação com a proveniente do Sensor de Posição (3.2.1.1.) se possa definir o estado dos transístores do conversor e, conseqüentemente, a polaridade da tensão aplicada. Como o controlo é igual em todas as fases, olhe-se para a fase 1 na Figura 25 como exemplo, que é definida pelas entradas Sinal f1 (proveniente do sensor de posição), i_{f1} (valor de corrente que circula no enrolamento da fase 1) e pela saída h1 (resultado do controlo histerético) [12].

Imagine-se que o rotor está alinhado com o estator de tal forma que a variável Sinal f1 é 1. Esta é a zona de funcionamento que interessa para a geração de energia elétrica [16], no entanto não convém deixar o valor de corrente que

circula na fase ultrapassar determinado valor para manter a integridade da mesma. Por isto é definido um valor de corrente de referência (I_{ref} , normalmente o valor de corrente nominal da máquina) e um intervalo de histerese. Aplicando uma histerese [17] [18] sobre o valor resultante da subtração $I_{ref} - i_{f1}$ obtém-se o sinal $h1$, que poderá ser 1 ou -1. Caso seja 1, os transístores do conversor associados à fase serão ativados, o que vai fazer com que a tensão aplicada aos enrolamentos tenha polaridade positiva, magnetizando-os; caso $h1$ seja -1, os mesmos transístores serão desativados, pelo que a polaridade da tensão aplicada será invertida e os enrolamentos irão desmagnetizar-se, gerando-se assim energia elétrica. Quando Sinal $f1$ é 0, a histerese terá como resultado -1 o que vai fazer com que os transístores do conversor estejam desativados.

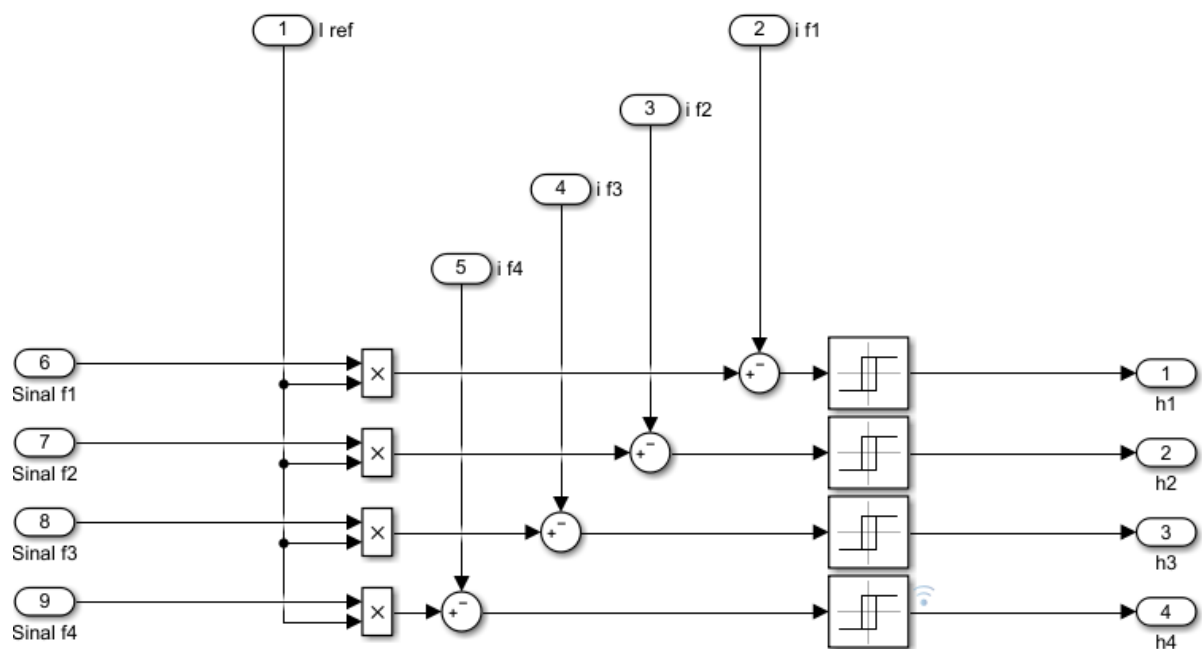


Figura 25 - Simulação Controlo de Corrente.

O processo descrito está explícito na Figura 25 e é assim que é definido o comportamento da corrente que circula na máquina.

3.2.1.2.2. Conversor

Para se simular o comportamento do conversor escolhido para implementação neste trabalho (conversor assimétrico em meia ponte (2.2.1.1. i)) foi feito um modelo matemático que se encontra representado na Figura 26. Como foi visto no ponto 3.2.1.2.1., as variáveis h_1 , h_2 , h_3 e h_4 podem assumir, cada uma delas, dois valores diferentes: 1 ou -1. Se o valor for de 1 os transístores estão ativos de modo a que tensão seja aplicada com polaridade positiva sobre um dos enrolamentos da máquina de forma a que estes se magnetizem o mais rápido possível. Caso os transístores estejam desativados, a polaridade da tensão é invertida, fazendo com que o enrolamento se desmagnetize. Posto isto, é fácil ver a utilidade de se utilizarem os valores referidos para as variáveis resultantes da histerese [19]. Para melhor compreender vejamos o que ocorre na fase 1 da Figura 26. Quando h_1 é -1, a corrente i_{f1} resultada da desmagnetização da fase. Como a polaridade da tensão é invertida, cria-se a necessidade de multiplicar h_1 não só por i_{f1} , mas também pelo valor que irá resultar na variável de saída V_{f1} que representa a tensão sentida na fase.

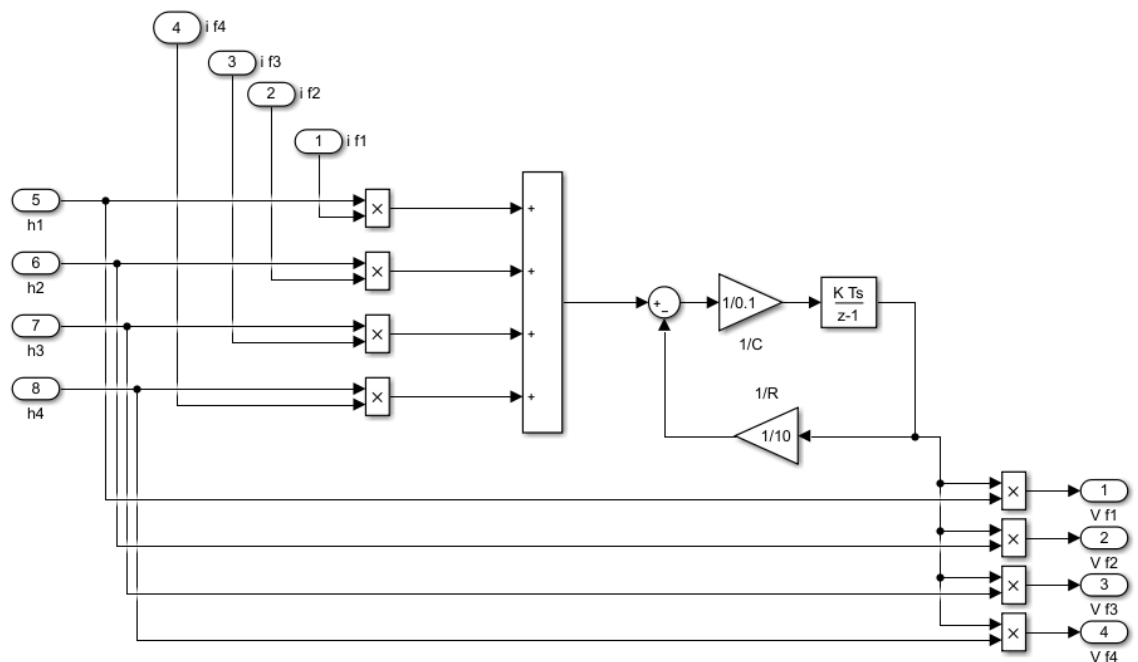


Figura 26 - Simulação Conversor.

Antes de continuar, nesta simulação assume-se que os valores de corrente que circulam em cada uma das fases é sempre positivo, mas não a sua variação, que pode ser positiva ou negativa [16]. Continuando a analisar a fase 1, quando $h1$ é 1, i_{f1} vai ser somado com alguma corrente que possa existir resultante da desmagnetização de uma outra fase. Em seguida a este valor vai ser subtraído o valor da corrente correspondente à energia dissipada pelos condutores do circuito, valor este que é obtido utilizando-se a lei de Ohm [20]. Como resultado desta operação obtém-se o real valor da corrente que circula na fase. No circuito da Figura 26 é possível ainda ver um condensador que atua como filtro de harmônicas [21] [22]. Posto isto, e para definir o valor da tensão que será aplicada na simulação, é efetuada uma operação com base na expressão (7).

$$i = C \frac{dv}{dt} \quad (7)$$

Como é possível verificar em (7), integrando o resultado da divisão da corrente pela capacidade do circuito ao longo do tempo obtém-se o valor da tensão que será aplicado ao enrolamento do motor. Como o resultado de uma integração é positivo, será $h1$ a definir a polaridade do valor calculado, como é possível verificar na Figura 26 quando este sinal é multiplicado pela tensão.

A Figura 5 b) representa o funcionamento do conversor no caso em que $h1$ é 1 e quando $h1$ é -1 o conversor pode ser representado pela Figura 5 d).

3.2.1.3. Fase da Máquina

A fase da máquina é simulada como é apresentado na Figura 27 e expressa o que resulta dos enrolamentos quando estes são sujeitos a determinadas condições. Utilizar-se-á novamente a fase 1 como exemplo visto que o funcionamento é semelhante em todas as fases. Ao valor da tensão aplicado à entrada do enrolamento é subtraído o valor da tensão correspondente às perdas que ocorrem no condutor. Como se verifica na Figura 27, o valor de tensão correspondente às perdas é obtido multiplicando o valor da corrente que circula nos enrolamentos pela resistência do material dos mesmos (foi considerado 0.05 Ohm) [23]. Mas antes disso, vejamos como é obtido o valor da corrente. Após a operação anterior,

obtem-se o valor de tensão eficaz imposto ao enrolamento, sobre o qual será feita uma integração que, segundo (8) resultará no valor do fluxo magnético produzido na estrutura da máquina em questão [24].

$$v = \frac{d\phi}{dt} \quad (8)$$

Obtido o valor do fluxo magnético, é necessário obter-se o valor da indutância para que se possa calcular o valor da corrente que circula no enrolamento, como é mostrado em (3). Através da posição angular presente na variável ângulo é possível determinar-se o valor de L , visto que este tem uma distribuição linear que varia com a posição do rotor relativamente ao estator (em 3.2.1.3.1. será melhor explicado como se obtém este valor na simulação, bem como o valor da variação da indutância relativamente à posição angular do rotor) [25]. Assim, depois de obtidos os valores referidos e segundo (3) divide-se o fluxo pela indutância para se obter o valor da corrente.

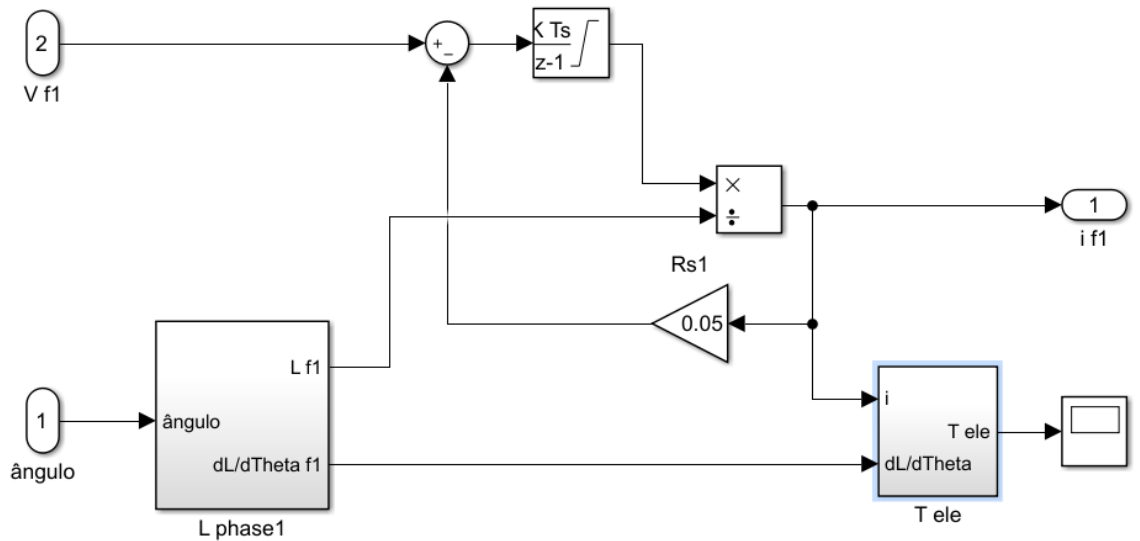


Figura 27 - Simulação fase da máquina.

Todo o processo descrito até aqui é mostrado na Figura 27. Depois de calculado o valor da corrente pode obter-se o valor do binário eletromagnético já que, segundo (4), a mesma corrente em conjunto com a variação da indutância

relativamente à posição angular do rotor (3.2.1.3.1) são os dois parâmetros necessários para o calcular. Este processo será melhor descrito no ponto 3.2.1.3.2..

3.2.1.3.1. L fase (dL/dTheta)

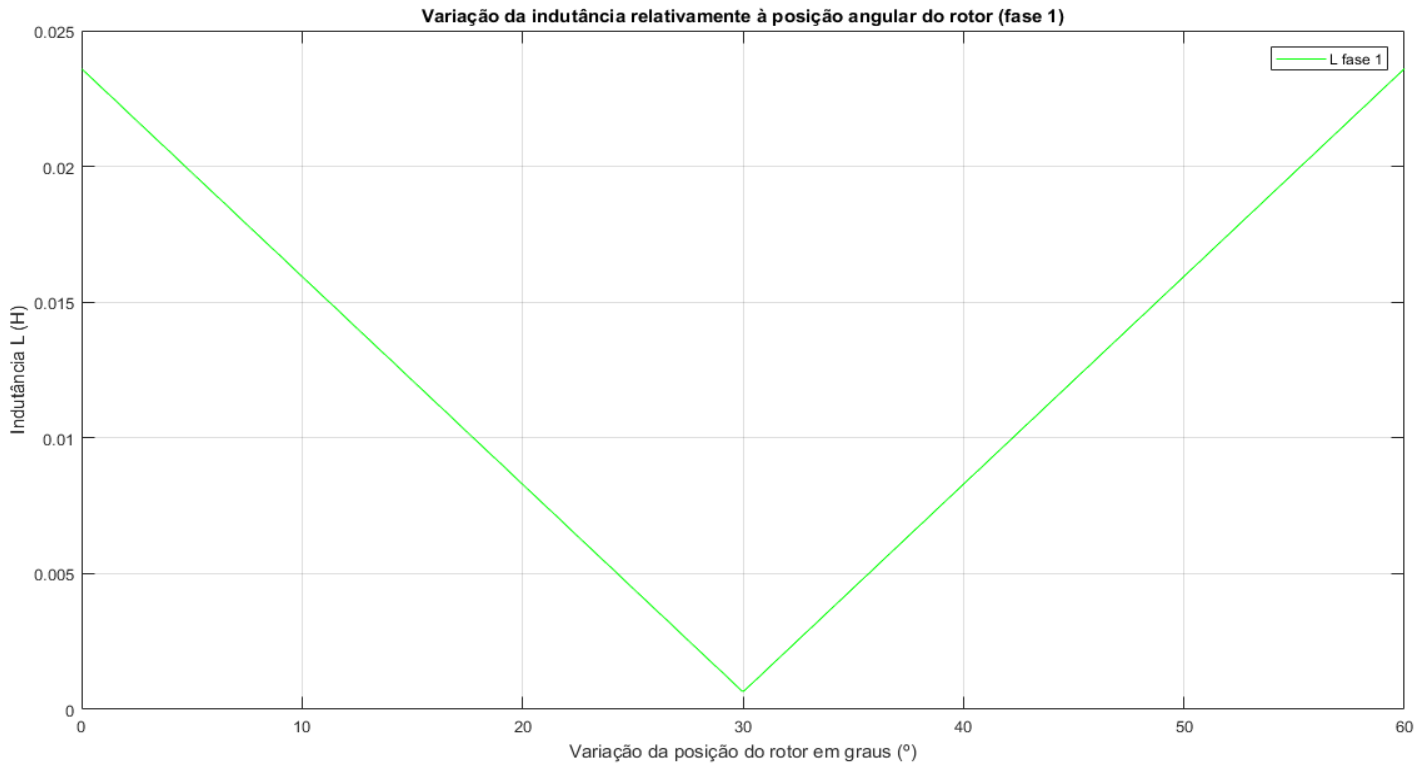


Figura 28 - Perfil de indutância da fase 1.

Como na máquina de relutância a indutância varia linearmente com a posição angular do rotor, para se determinar o seu valor é apenas necessário saber a posição angular do rotor. Para tal, criou-se uma lookup table [26] para cada uma das fases que representa o seu perfil de indutância, cada uma delas com 800 pontos que variam entre o valor definido de L_{\min} e L_{\max} (os dados de cada uma das lookup table estão representados na Figura 22. Na Figura 28 é mostrado em separado o perfil de indutância da fase 1 como exemplo; explicação para a distribuição de dados no intervalo de $[0^\circ, 60^\circ]$ no ponto 3.2.1.1).

Analisando a Figura 29, é possível verificar que para além do valor da indutância é também importante saber-se o valor da variação da mesma relativamente à posição angular do rotor que, como se verá em 3.2.1.3.2, é um dos parâmetros que permite calcular o binário eletromagnético.

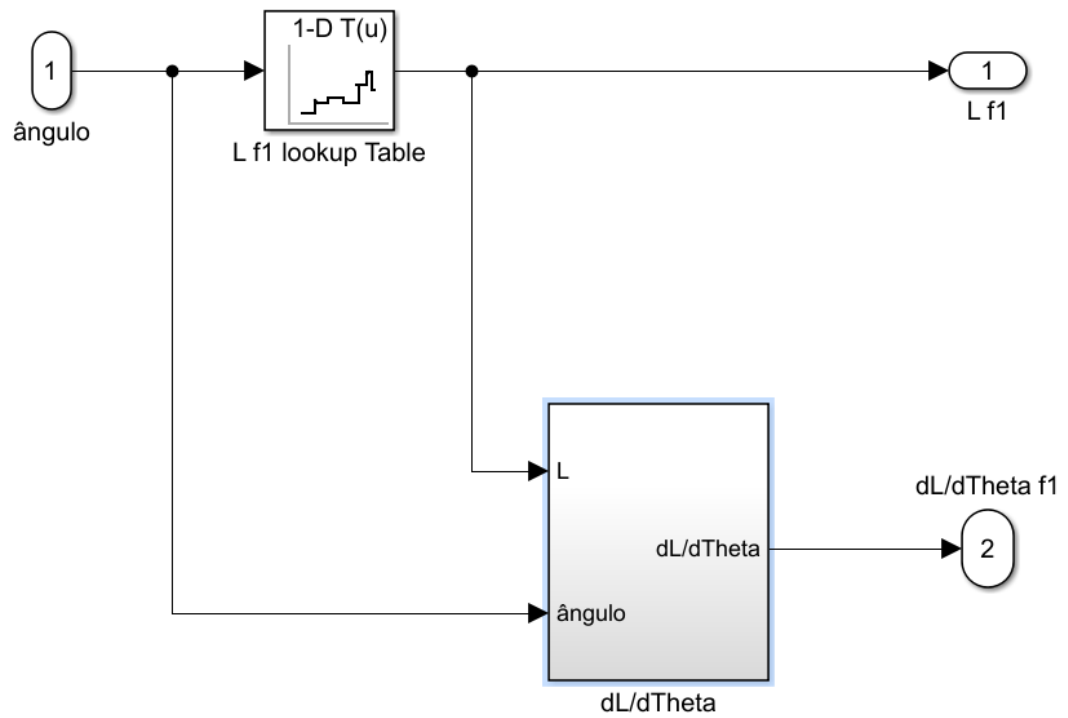


Figura 29 - Simulação indutância (L) da fase 1 da máquina.

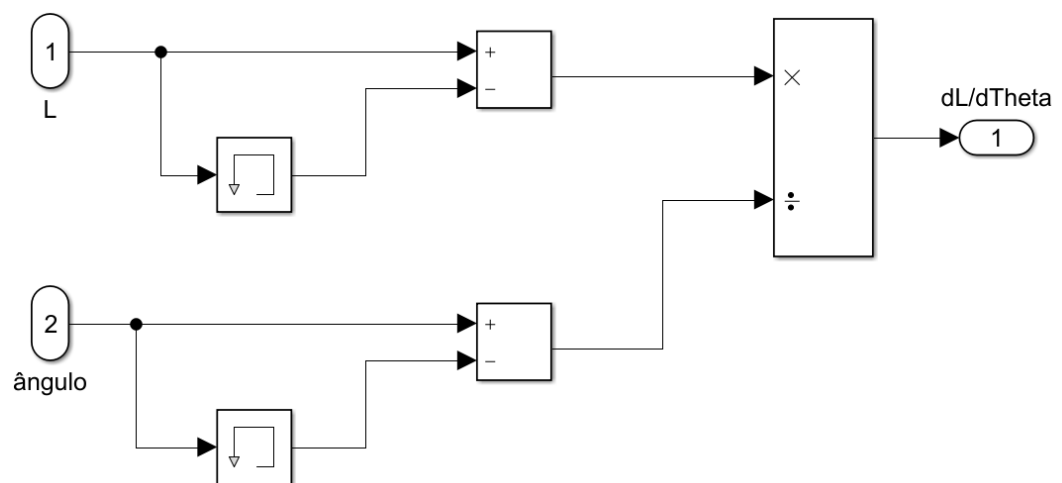


Figura 30 - Simulação variação da indutância ao longo da posição angular do rotor.

Analisando a Figura 30 verifica-se que aos valores obtidos da indutância e da posição angular são subtraídos, respetivamente, os valores de indutância e de posição angular da última leitura. Dividindo o resultado da subtração de indutâncias pelo resultado da subtração das posições angulares resulta o valor da variação da indutância da fase 1 relativamente à posição angular, $dL/d\theta$ f1 $\left(\frac{dL}{d\theta}\right)$.

3.2.1.3.2. Binário eletromagnético

O binário eletromagnético obtém-se a partir da expressão matemática (4), no qual é representada na Figura 31 a sua implementação em Matlab/Simulink. Para que a operação seja bem-sucedida é necessário que os valores de corrente e de variação de indutância com a posição angular estejam definidos [1].

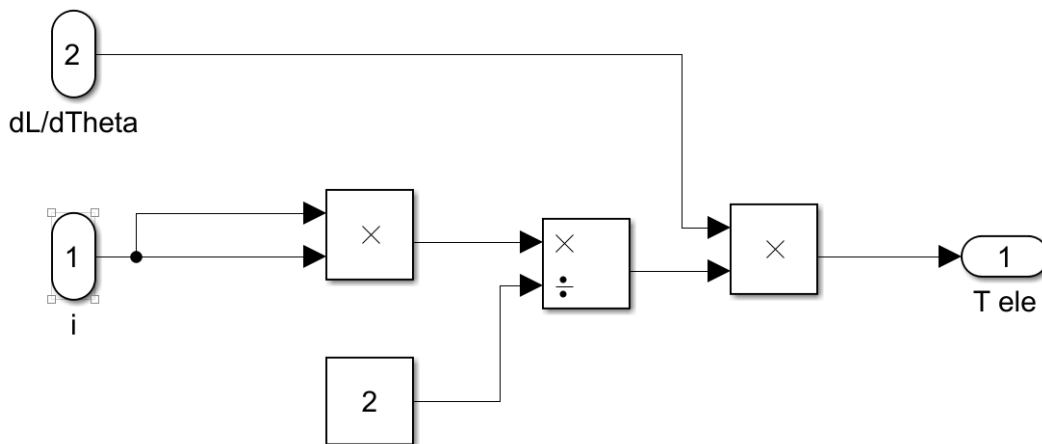


Figura 31 - Simulação do binário eletromagnético.

4. Desenvolvimento experimental

Para que seja possível a implementação laboratorial dos modelos referidos nos capítulos 3 e 4 e a recolha dos respetivos resultados é necessário construir circuitos que suportem o funcionamento da máquina. Neste capítulo será descrito todo o trabalho laboratorial que foi realizado para acionar a máquina.

4.1. Montagem

A montagem laboratorial realizada neste trabalho encontra-se descrita pela Figura 32 que está dividida em 5 partes:

1. Controlo;
2. Fonte de alimentação e reóstato de carga;
3. Sensor de efeito de hall (corrente);
4. Conversor de potência e máquina elétrica;
5. Sensor de posição.

Na mesma figura está representada a montagem genérica para apenas uma das 4 fases da máquina, sendo que a montagem é exatamente igual para cada uma delas. Para que se possa visualizar e perceber a montagem deve olhar-se para as Figura 32 e Figura 33 e estabelecer relações.

Na Figura 33, em a), está representado o conversor de potência, que é constituído por módulos IGBT [27] e um dissipador. O conversor está representado na Figura 32 em 4 (onde também está representada a correspondente fase da máquina) e é possível verificar que para magnetizar o enrolamento são necessários dois braços, cada um deles constituídos por um transístor IGBT e por um diódo. Cada um destes braços é um dos módulos IGBT que estão assentes no dissipador, como se pode ver na Figura 33 a). Na mesma figura é possível ver os sensores de efeito de hall [28] fixados em placas brancas que devolvem um valor de tensão, onde cada 1 Volt representa 1 Ampere. Estes sensores serão responsáveis por informar o controlador do valor da corrente que circula nos enrolamentos da máquina de forma que o controlo de corrente seja implementado.

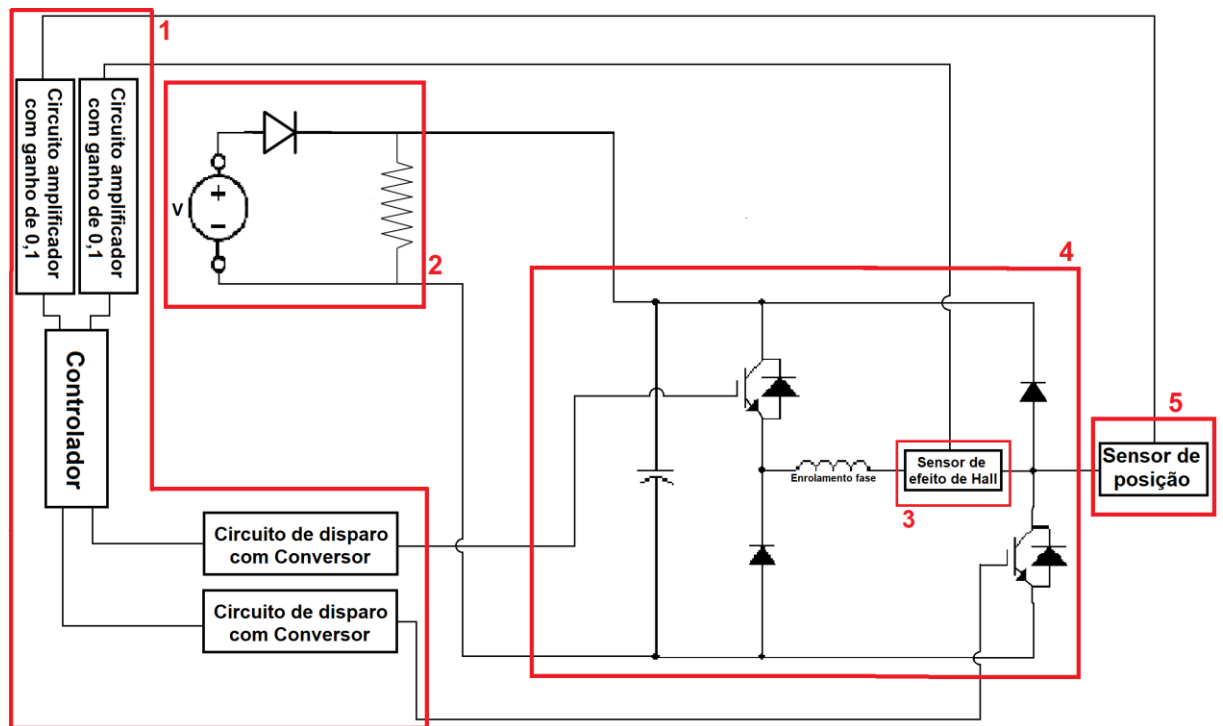


Figura 32 - Esboço da montagem laboratorial. 1 - Controle; 2 - Fonte de alimentação e reóstato de carga de alta potência; 3 - Sensor de efeito de hall; 4 - Conversor de potência e máquina elétrica; 5 - Sensor de posição.

A Figura 33 b) mostra os circuitos que controlam os transístores dos módulos IGBT, que por sua vez vão determinar a forma como a tensão é aplicada na máquina, permitindo-se assim que o controlo da mesma ocorra. Estes circuitos estão representados na Figura 32 1 e será feita uma descrição mais detalhada no ponto 4.2.1.. Em c) vê-se o osciloscópio, que permite verificar o comportamento do circuito, e também a fonte de alimentação que está representada na Figura 32 2 e é responsável por alimentar a máquina. Em d) pode observar-se duas máquinas acopladas: uma de cor azul (máquina à esquerda na figura) e uma de cor laranja (máquina à direita na figura). A máquina em estudo é a máquina azul (máquina de relutância comutada 8/6, à esquerda na imagem), sendo a laranja utilizada como auxiliar para lhe impor velocidade de forma a possibilitar o teste de geração de energia. Pode ainda ver-se um variador de velocidade que é utilizado para acionar a máquina laranja e o sensor de posição acoplado à máquina azul, representado na Figura 32 5, que devolve um valor entre 0V e 10 V que corresponde, respetivamente, a um valor entre 0° e 360°. Um dos enrolamentos da máquina azul (sobre a qual é efetuado o controlo) está representado na Figura 32 4.

Na Figura 33 e) é possível ver o sistema de controlo, duas fontes de alimentação que alimentam o sensor de posição acoplado à máquina azul, os circuitos de controlo e os sensores de efeito de hall e ainda o díodo que é utilizado para evitar que a corrente proveniente do enrolamento volte à fonte de alimentação, direcionando-a para o reóstato de carga, representado na Figura 33 f) e na Figura 32 2.



Figura 33 - Imagens da montagem. a) Circuito conversor de potência e sensores de hall; b) Circuitos de controlo; c) Osciloscópio e fonte de alimentação do circuito; d) montagem máquina de relutância; e) Controlo e medidor de potência (wattímetro); f) reóstato de carga de alta potência.

4.2. Controlo

De forma a assegurar o correto controlo da máquina foi necessário desenvolver circuitos envolventes ao controlador e também um algoritmo de controlo para cada tipo de funcionamento: gerador e motor (Anexo A e Anexo B, respetivamente).

4.2.1. Circuitos de controlo

Para auxiliar o controlador foram desenvolvidos 2 tipos distintos de circuitos: um circuito de aquisição de sinais e um circuito de disparo, para controlar os transístores dos módulos IGBT. Estes circuitos são explicados nos pontos 4.2.1.1 e 4.2.1.2, respetivamente, e estão representados na Figura 32 1 e na Figura 34.

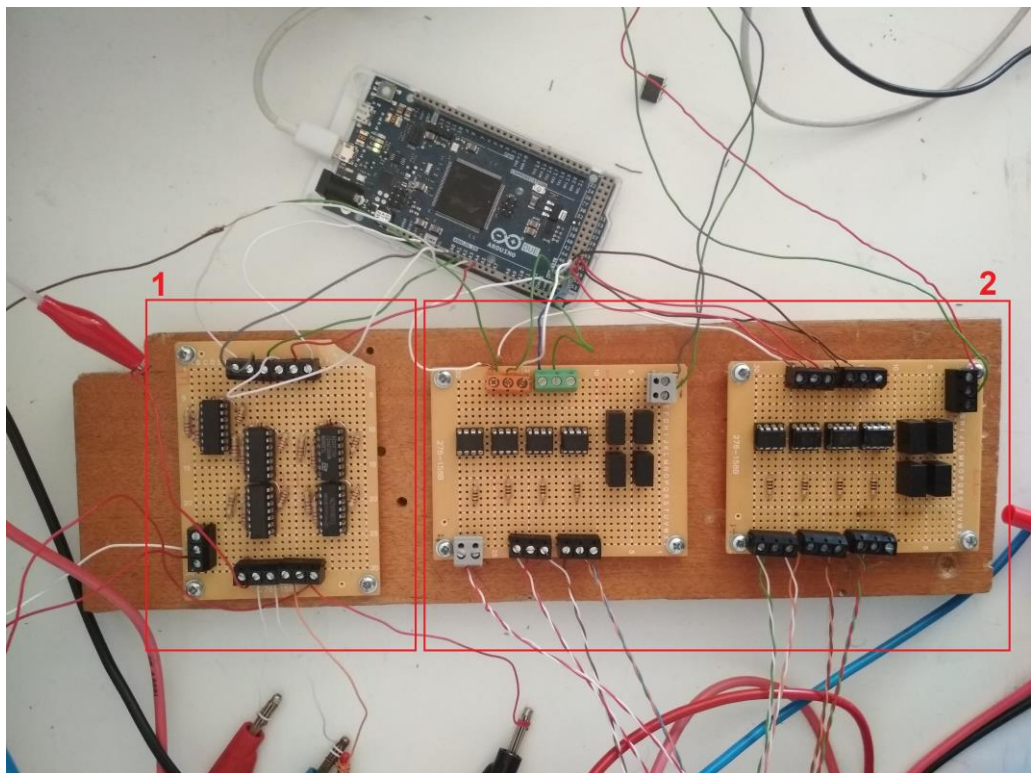


Figura 34 - Circuitos de controlo. 1 - Circuitos amplificadores com ganho de 0,1; 2 - Circuitos de disparo com conversor.

4.2.1.1. Circuito de aquisição de sinais

Para o circuito de aquisição de sinais foram utilizados amplificadores operacionais, nomeadamente o TL084 [29], que está representado na Figura 35.

A partir do amplificador operacional representado na Figura 35, foram construídos 5 circuitos iguais com um ganho de 0.1. Cada um destes circuitos está representado na Figura 36 sendo que o conjunto dos 5 circuitos utilizados em laboratório podem ver-se na Figura 34 2. Cada um deles foi utilizado para modular os valores lidos dos 4 sensores de efeito de hall e do sensor de posição.

Ainda sobre o circuito da Figura 36, como o controlador utilizado é o Arduino Due e este só consegue ler valores com uma tensão entre 0V e 3.3V, achou-se conveniente introduzir um ganho de 0.1 a todos os valores lidos, isto porque, normalmente, nenhum desses valores ultrapassa os 10V. Já que nenhum desses valores ultrapassa os 10V e há um ganho de 0.1, no máximo, à entrada do controlador, estará uma tensão de 1V.

Assim, decidiu utilizar-se um diodo de zener [30] de 2.4V para proteger o Arduino contra algum pico de tensão que possa ocorrer e que seja prejudicial para o dispositivo.

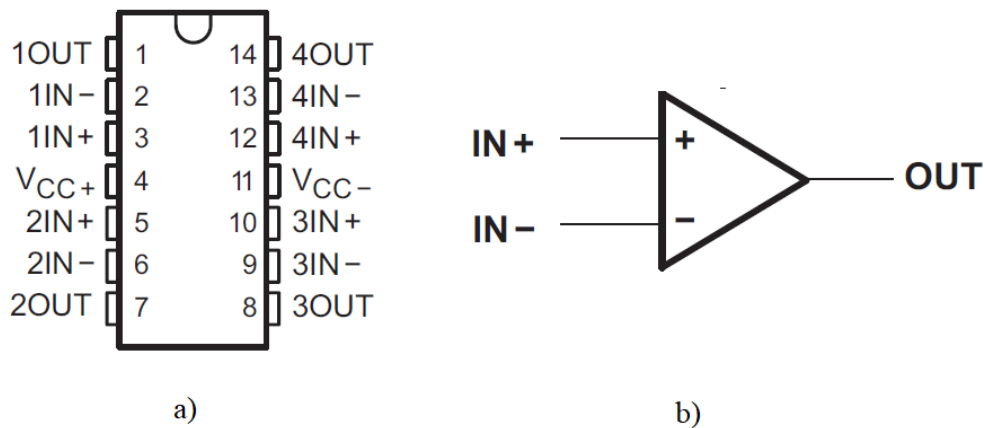


Figura 35 - Amplificador operacional TL084 JFET. a) Exterior do amplificador; b) Circuito representativo de cada conjunto de entradas e respetiva saída.

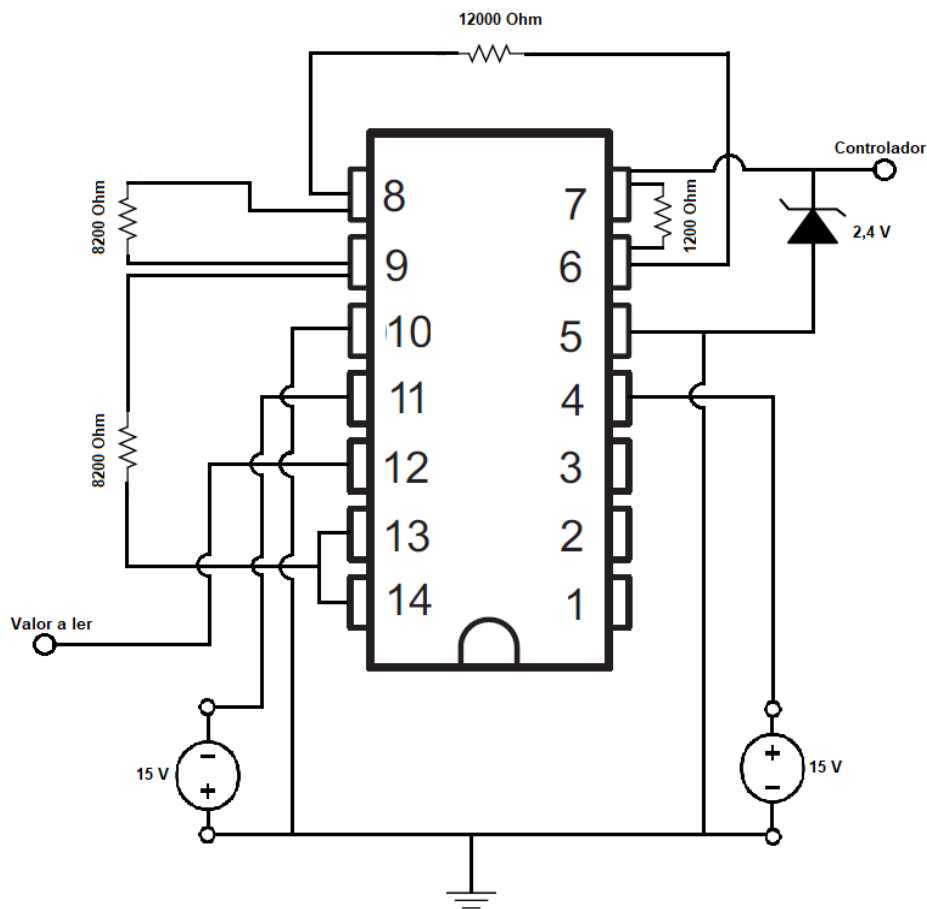


Figura 36 - Circuito amplificador com ganho 0.1.

4.2.1.2. Circuito de disparo

O circuito de disparo está representado nas Figura 32 1, Figura 34 1 e Figura 37, devendo seguir-se esta última de forma a que a explicação do seu funcionamento seja melhor compreendida.

Quando no controlador determinada porta digital de saída é acionada, essa mesma porta vai transmitir um sinal com uma amplitude de 3.3V. Como o objetivo deste sinal é ativar um transístor do modulo IGBT de potência (Figura 33 a)) e este se ativa com uma tensão de gate de 15V, é necessário um circuito que eleve a tensão desde a saída do controlador até à gate do transístor.

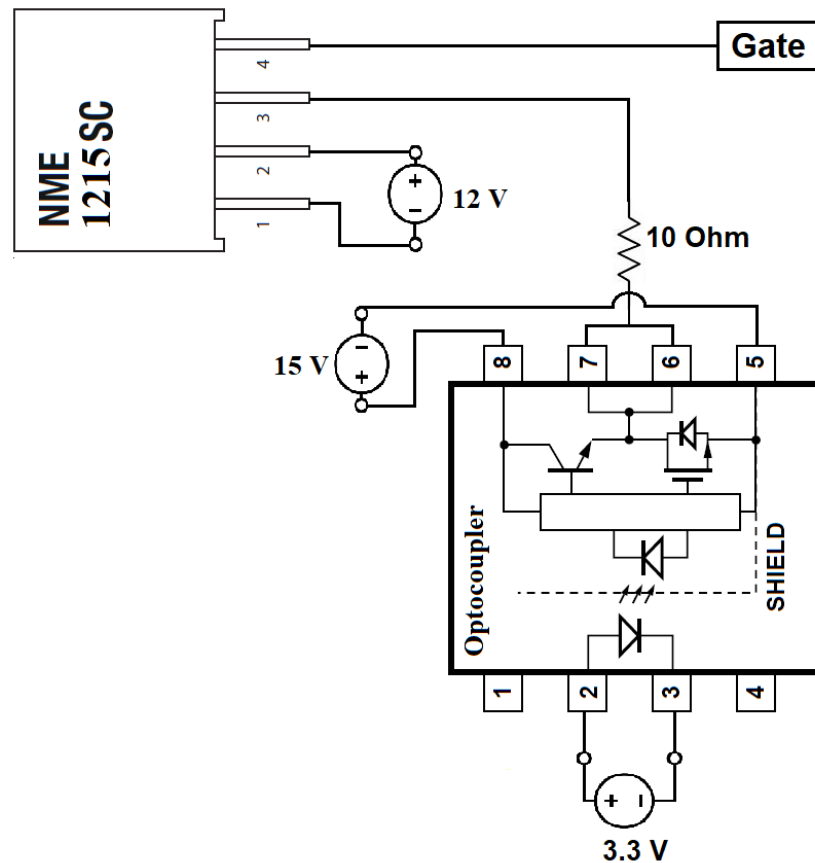


Figura 37 - Circuito amplificador com ganho de 0.1.

Por outro lado, de modo a isolar a parte de potência da parte de comando, foi utilizado um optocoupler HCPL-3120 e para alimentar o secundário do mesmo utilizou-se um conversor NME1215SC.

4.2.2. Algoritmo de controle

Foram desenvolvidos dois algoritmos de controle, um para o funcionamento gerador e outro para o funcionamento motor que estão nos Anexo A e Anexo B, respetivamente (consultar para ver em mais detalhe).

Sendo que um algoritmo é um processo que assume determinado comportamento consoante as variáveis de entrada, vejamos quais as entradas e as saídas e como estas vão influenciar o processo. Existem 3 tipos de variáveis de entrada:

as correntes, o valor do sensor de posição e os limites de operação. Quando se verifica que o valor do sensor de posição se encontra dentro de determinados limites associados a determinada fase, o controlo de corrente vai ser ativo para essa mesma fase. A partir daqui e até que os limites deixem de se verificar, o valor de corrente lido é o que vai ditar a ativação ou a desativação dos transístores dos módulos IGBT consoante a definição do controlo histerético, que neste trabalho foi definido tendo limites de +0.01 e -0.01. Quando os limites de posição deixam de se verificar, apenas há um estado à saída do controlador: 0, que desativa os transístores IGBT.

Para se definir os limites de posição foi aplicada uma tensão a cada uma das fases, de forma a criar pontos de referência (as referências são as posições nas quais cada uma das fases assume o seu máximo valor de indutância. A Figura 22 está concordante com a realidade no que toca à distribuição do perfil de indutância. No entanto, os valores de L_{max} e L_{min} já mostrados não são os da máquina em teste). Assim, sabendo os pontos de referência, que não se deve magnetizar duas fases simultaneamente e que a máquina assume um comportamento gerador e motor [1] [16] [31] quando magnetizada/desmagnetizada durante o período em que a sua indutância tem uma variação negativa ou positiva, foram definidos os limites presentes na Tabela 2 e na Tabela 3 para o funcionamento motor e gerador, respetivamente.

Tabela 2 - Ângulos de controlo implementados em laboratório - funcionamento motor.

	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 4
θ_{on}	45	15	0	30
θ_{off}	60	30	15	45

Tabela 3 - Ângulos de controlo implementados em laboratório - funcionamento gerador.

	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 4
θ_{on}	-0.5	29.5	14.5	44.5
θ_{off}	14.5	44.5	29.5	59.5

Para terminar, cada um destes limites foi deslocado 5 vezes 60° no sentido de rotação devido às características mecânicas da máquina como já foi visto anteriormente.

5. Apresentação e análise de Resultados

Após o desenvolvimento dos modelos de simulação em Matlab/Simulink e do trabalho experimental, foram recolhidos resultados que serão apresentados e discutidos neste capítulo. Para cada um dos modos de funcionamento (motor e gerador) será mostrado o que se pretendia atingir (simulação) e o que realmente se obteve (experimentação). Todos os resultados recolhidos laboratorialmente foram tratados em Matlab, tendo sido aplicado um filtro de média aos dados relativos às correntes de forma a eliminar ruído, tornando-os mais claros. Todos os resultados aqui apresentados estão expressos em função do tempo. Os valores de corrente são recolhidos por pinças amperimétricas que apresentam uma relação de 0.1V por cada 1A.

5.1. Motor

Os resultados obtidos na simulação do motor são a referência para o que se pretende obter com a implementação laboratorial. Embora esta simulação já estivesse previamente desenvolvida, foi feito um ajuste nas suas condições de funcionamento, nomeadamente a corrente de referência e a velocidade, de forma a ir

ao encontro das condições impostas em laboratório para que o comportamento entre ambas fosse semelhante.

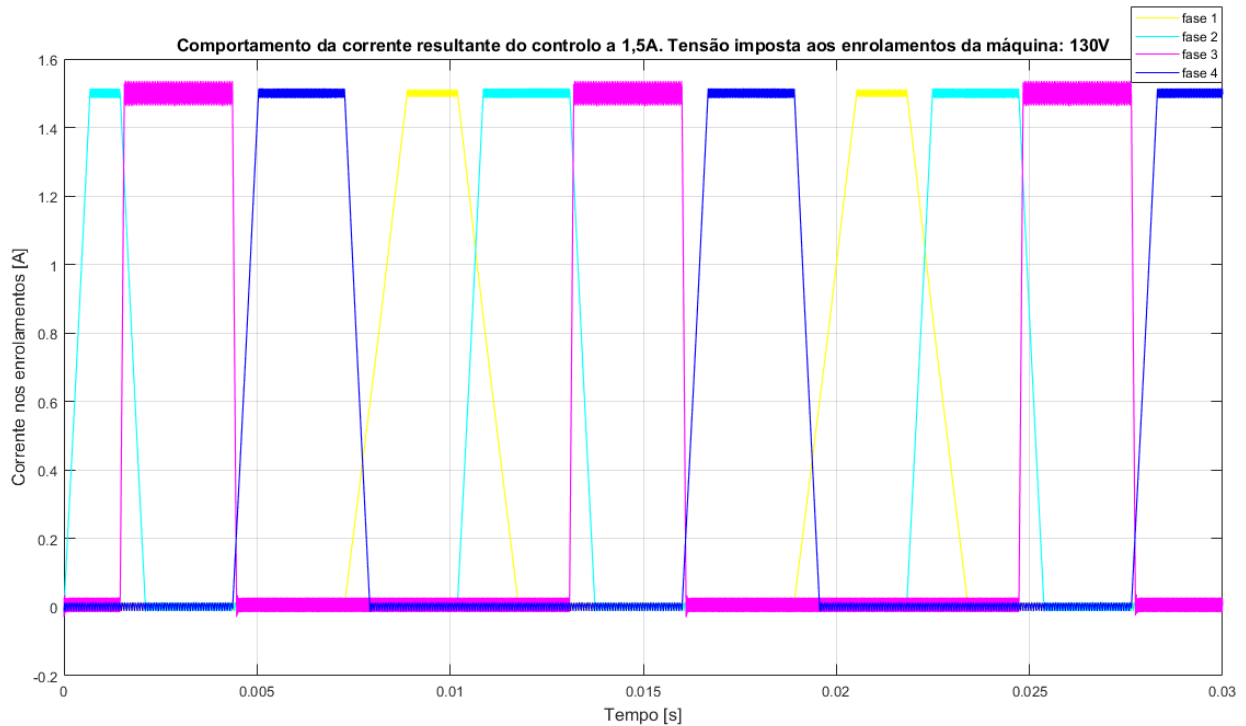


Figura 38 - Comportamento da corrente nas diferentes fases da máquina - simulação motor.

Nas Figura 38, Figura 39 e Figura 40 apresentam-se os resultados da simulação obtidos por Matlab/Simulink e que permitem verificar o comportamento do motor. A Figura 38 apresenta as formas de onda das correntes nos vários enrolamentos do motor, a Figura 39 a tensão aplicada a esses enrolamentos e a Figura 40 as correntes e tensões.

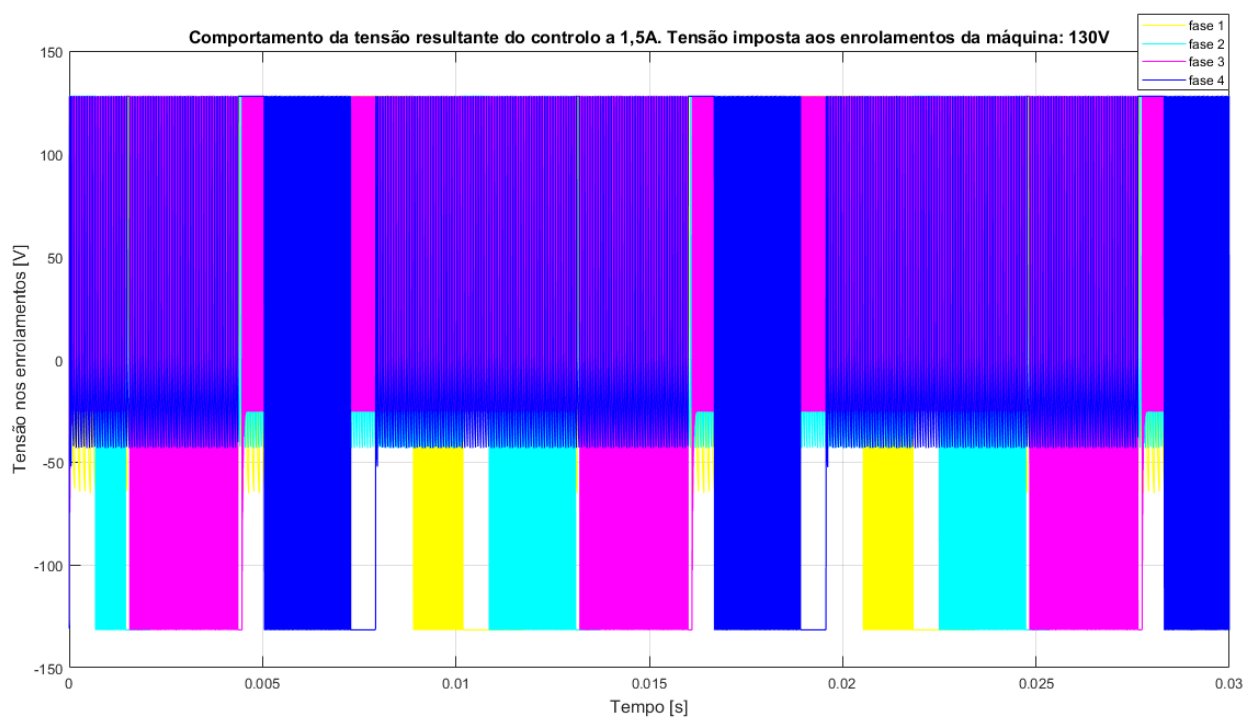


Figura 39 - Comportamento da tensão nas diferentes fases da máquina - simulação motor.

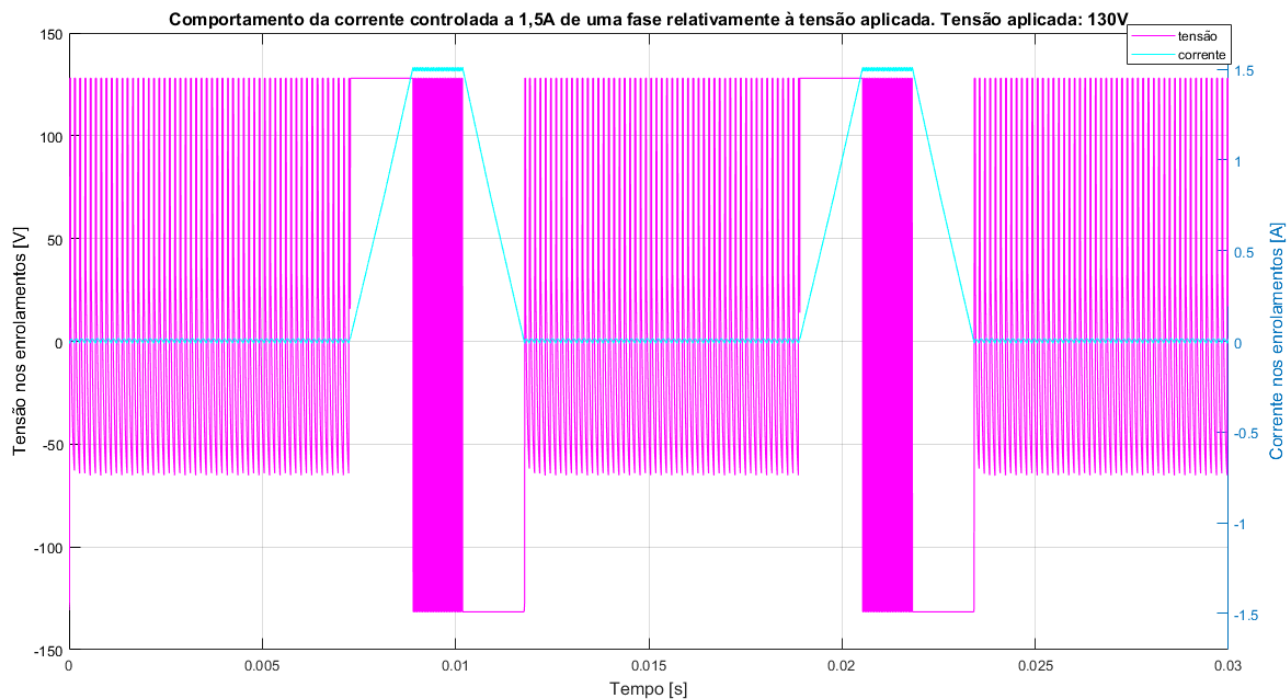


Figura 40 - Comportamento da corrente e da tensão nas fases da máquina - simulação motor.

Relativamente ao protótipo laboratorial foram obtidos os resultados mostrados nas Figura 41, Figura 42 e Figura 43.

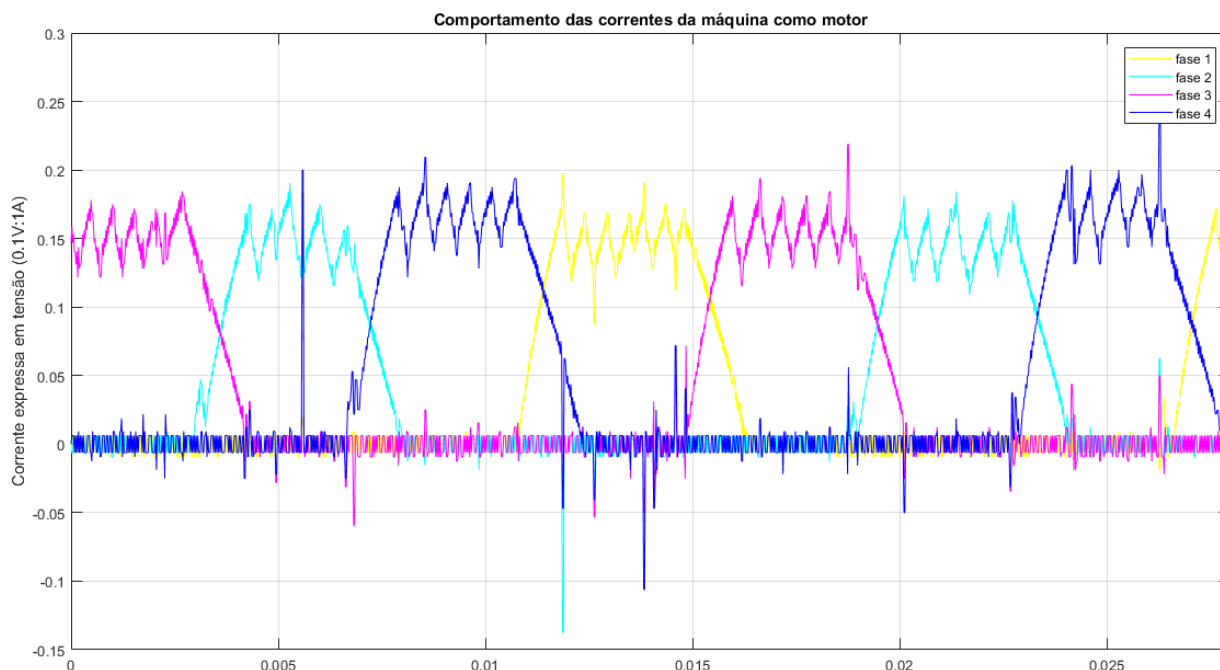


Figura 41 - Comportamento da corrente nas diferentes fases da máquina - ensaio motor.

A Figura 41 apresenta as formas de onda das correntes nas diferentes fases da máquina, a Figura 42 apresenta as tensões nas diferentes fases da máquina e a Figura 43 apresenta as formas de onda da corrente e tensão numa das fases da máquina.

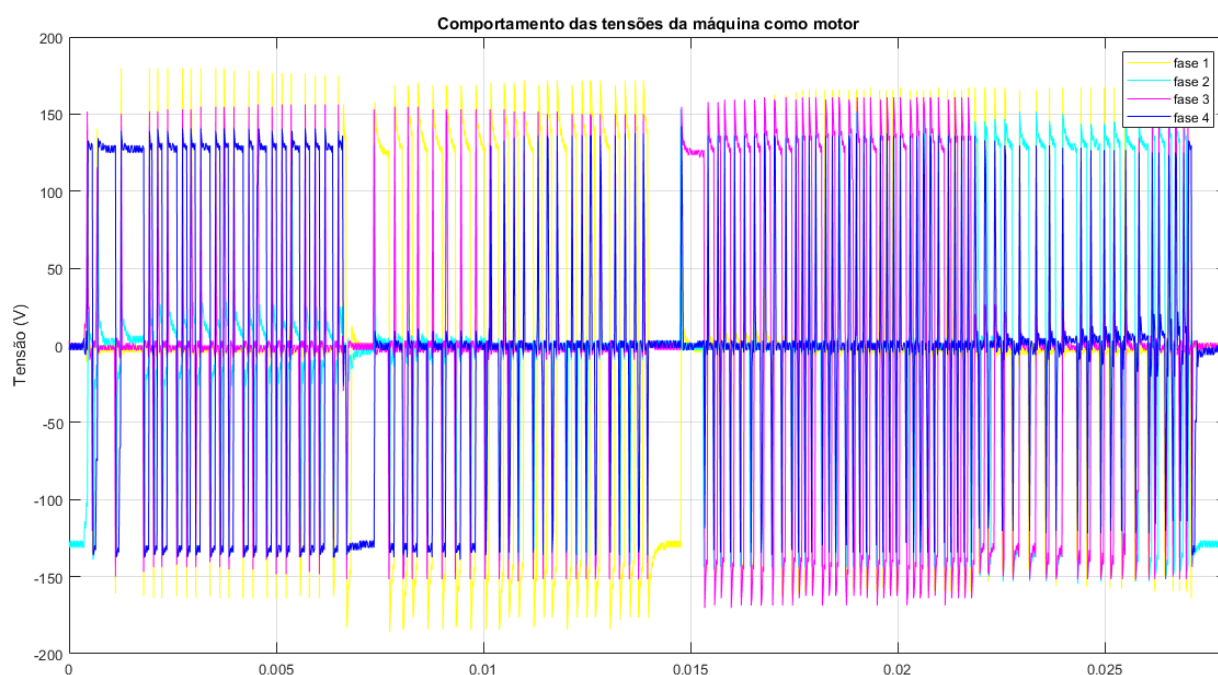


Figura 42 - Comportamento da tensão nas diferentes fases da máquina - ensaio motor.

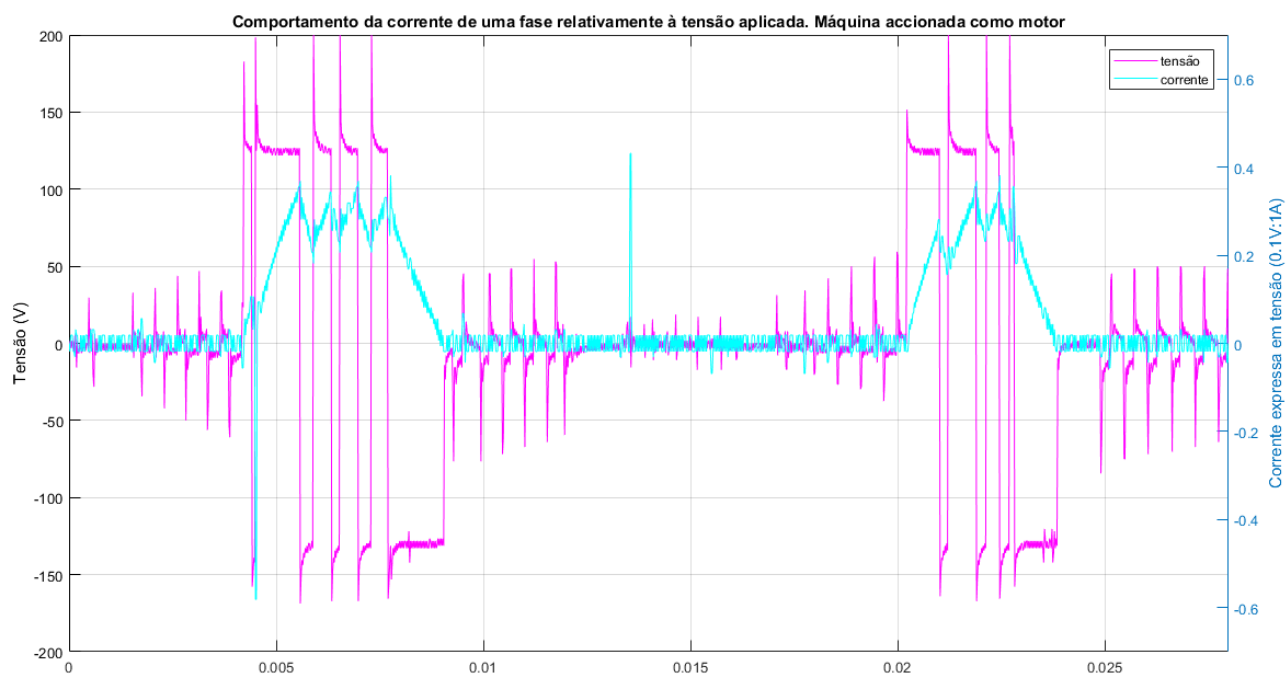


Figura 43 - Comportamento da corrente e da tensão em uma das fases da máquina - ensaio motor.

Comparando a Figura 43 com a Figura 40 verifica-se que laboratorialmente se obteve um comportamento semelhante ao verificado na simulação. As diferenças verificadas devem-se às condições físicas da máquina, às diferentes velocidades da simulação e da experimentação e à frequência de trabalho do controlador implementado experimentalmente, já que este aplica o controlo a uma frequência bastante menor do que a que é aplicada na simulação. Quanto maior a velocidade, mais rápido o polo do rotor passa a zona dos limites de ativação de cada uma das fases, o que faz com que a corrente tenha menos tempo para aumentar o seu valor. Assim, à medida que a velocidade aumenta, o valor da corrente em cada uma das fases diminui, não chegando a atingir sequer o valor de referência quando este não é definido corretamente. Como na experimentação não é aplicada uma velocidade alta, este efeito não se verifica, podendo assim retirar-se resultados onde o controlo de corrente é notório, como se pode ver na Figura 41. Adicionalmente, no ensaio experimental foram medidos os valores de potência e são mostrados na Tabela 4. O valor da potência fornecida à máquina (magnetização dos enrolamentos) é maior do que o valor de potência obtida (desmagnetização dos enrolamentos), o que era expectável.

Tabela 4 - Valores de potência medidos - ensaio motor.

	Fornecida	Obtida
Potência (w)	153.5	136

Assim, é possível concluir que o objetivo de implementar o comportamento motor à máquina foi alcançado.

5.2. Gerador

Para verificar o comportamento da máquina de relutância como gerador serão apresentados resultados de duas simulações e de dois ensaios com valores de velocidade diferentes: 1500 rpm e 3000rpm. As condições de controlo serão as mesmas, tanto para as simulações Matlab/Simulink como para a implementação experimental, ou seja, o valor de corrente de referência será sempre o mesmo, 0.7A, e os valores dos limites de ativação estão representados na Tabela 1 e na Tabela 3 para as simulações e para os ensaios experimentais, respetivamente.

5.2.1. Gerador - 1500rpm

Nesta secção serão apresentados os resultados laboratoriais relativos ao ensaio da máquina como geradora de energia a uma velocidade de 1500rpm.

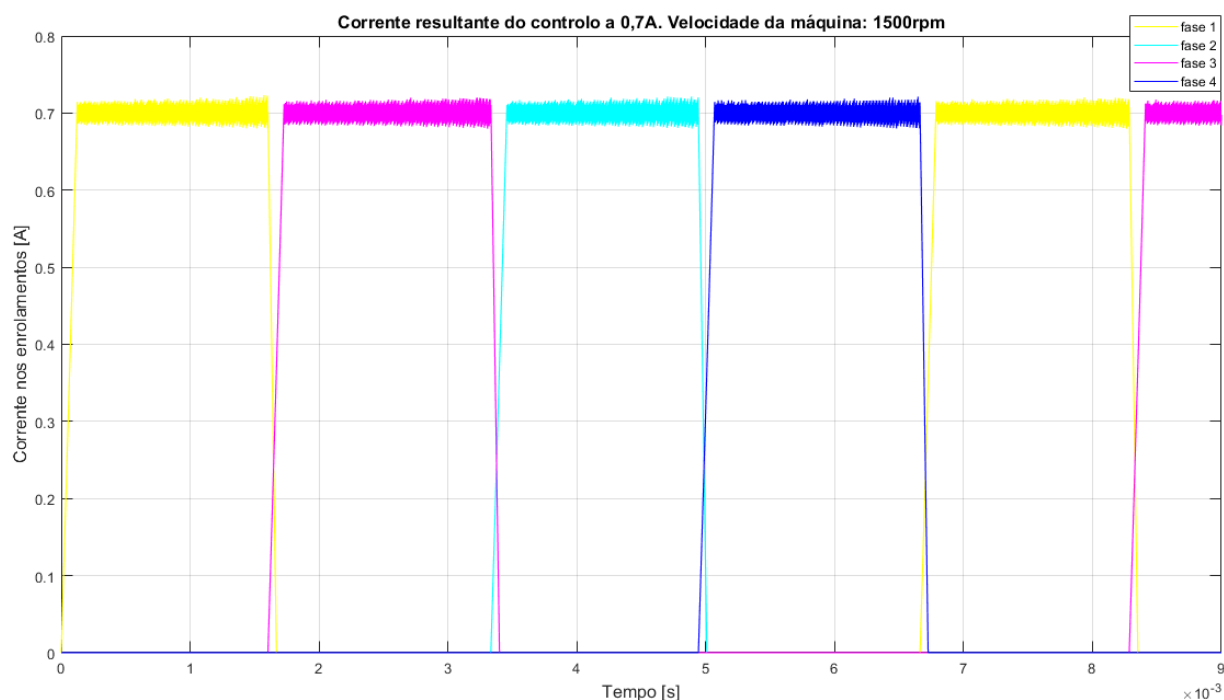


Figura 44 - Comportamento da corrente nas diferentes fases da máquina - simulação gerador 1500rpm.

Os resultados apresentados pelas Figura 44, Figura 45 e Figura 46 dizem respeito às simulações efetuadas em Matlab/Simulink. Na Figura 44 é possível ver o comportamento da corrente nos enrolamentos da máquina, na Figura 45 vê-se as formas de onda da tensão aplicada aos enrolamento e na Figura 46 são apresentadas as formas de onda da corrente a tensão correspondentes a uma das fases da máquina, onde se pode ver o efeito do controlo sobre a tensão e consequente efeito na corrente.

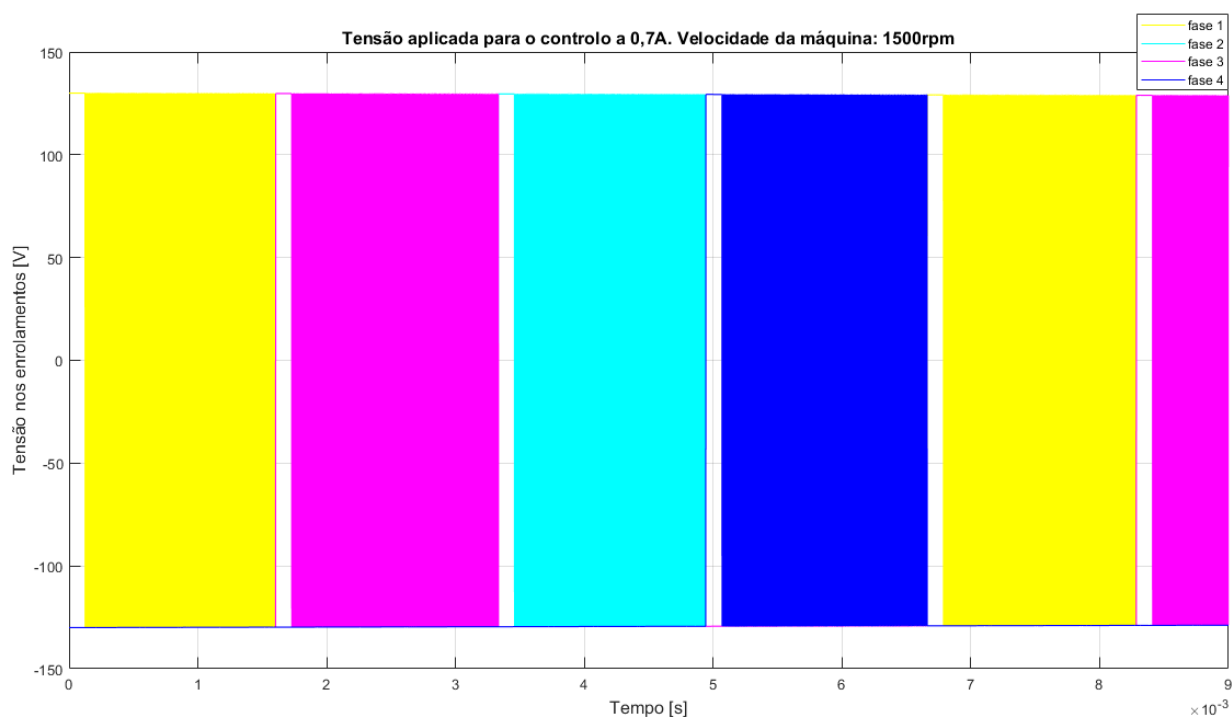


Figura 45 - Comportamento da tensão nas diferentes fases da máquina - simulação gerador 1500rpm.

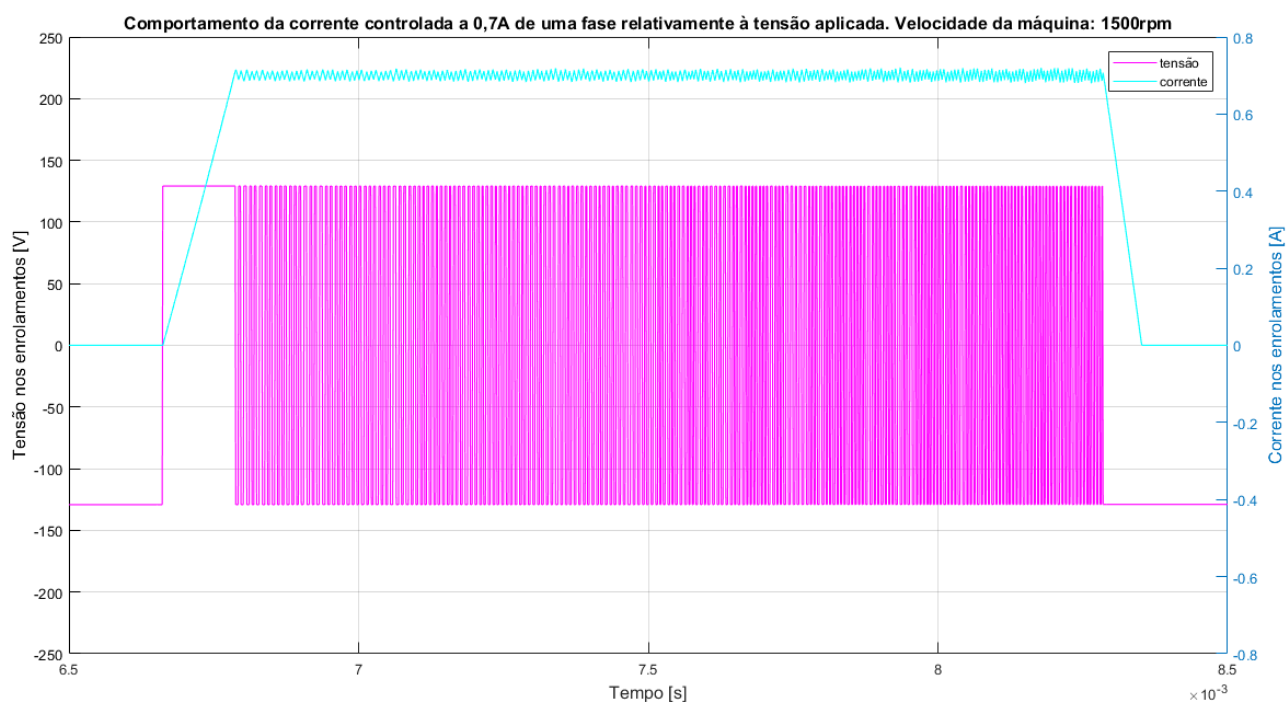


Figura 46 - Comportamento da corrente e da tensão em uma das fases da máquina - simulação gerador 1500rpm.

Após a análise dos resultados das simulações, verificou-se que no gráfico das correntes, o valor da área das curvas de magnetização é inferior ao da área das curvas de desmagnetização, o que confirma o comportamento como gerador da simulação, sendo este o comportamento pretendido para se implementar experimentalmente. As Figura 47, Figura 48 e Figura 49 apresentam respectivamente, os resultados experimentais da corrente, a tensão e a corrente e a tensão de uma das fases da máquina.

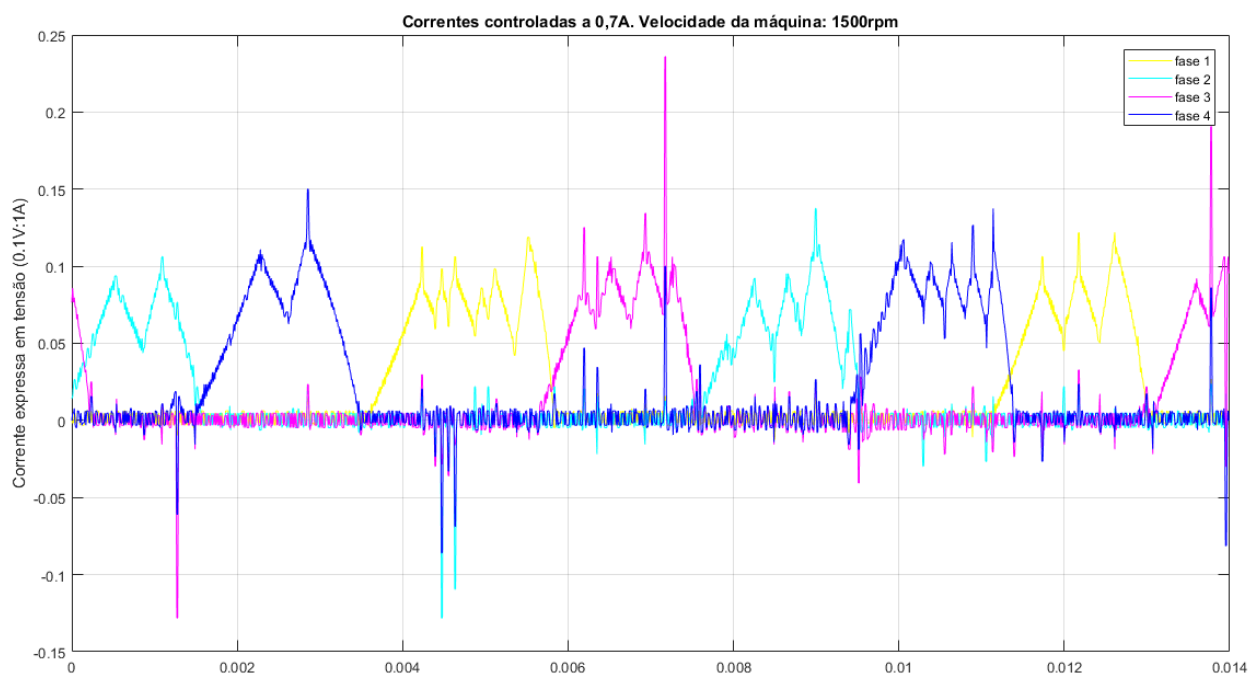


Figura 47 - Comportamento da corrente nas diferentes fases da máquina - ensaio gerador 1500rpm.

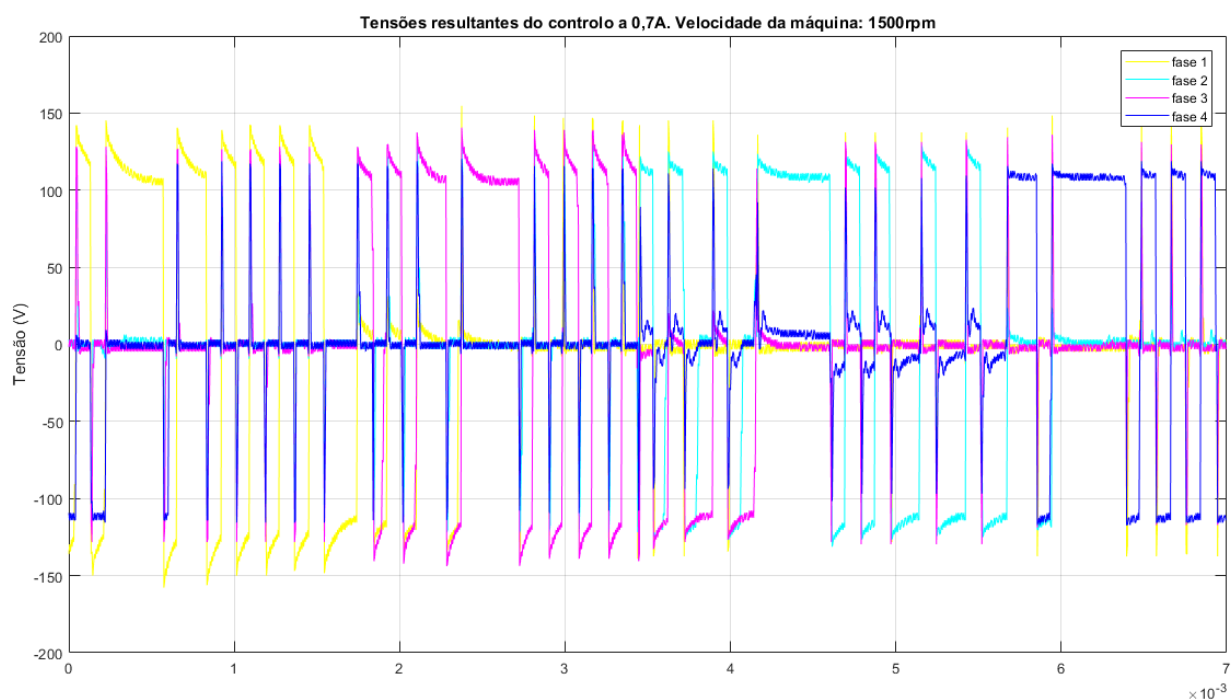


Figura 48 - Comportamento da tensão nas diferentes fases da máquina - ensaio gerador 1500rpm.

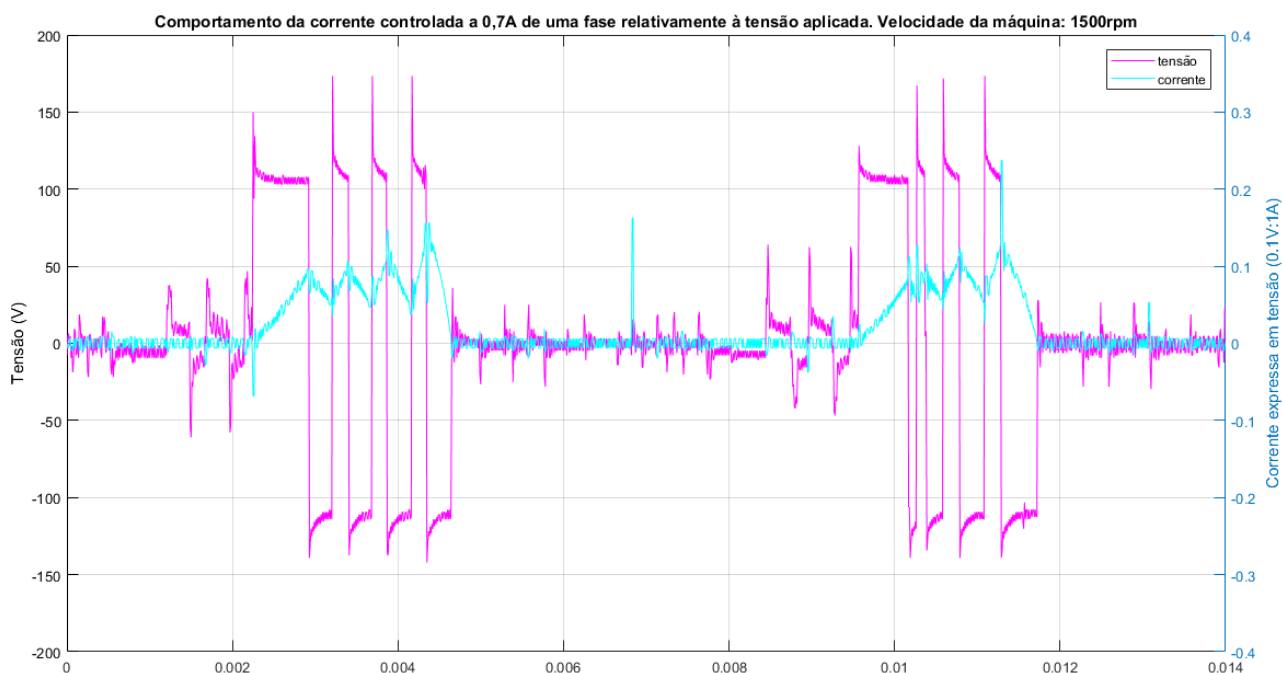


Figura 49 - Comportamento da corrente e da tensão em uma das fases da máquina - ensaio gerador 1500rpm.

Comparando as Figura 46 e Figura 49 verifica-se que estas apresentam um comportamento semelhante. No entanto, os resultados experimentais não são tão lineares como os simulados por dois fatores: características físicas da máquina não consideradas para a simulação, e frequência de trabalho do controlador, que deveria ser maior. Neste trabalho, a problemática das características físicas da máquina é difícil de contornar porque estas dependem da construção da mesma; por outro lado, implementando um controlador com uma frequência de trabalho maior do que o utilizado (Arduíno Due) seria possível efetuar-se um controlo de corrente mais eficaz, pelo que se iriam produzir melhores resultados.

A confirmação de que a máquina tem um funcionamento como gerador vem dos resultados da medição de potências apresentados na Tabela 5. Verifica-se que a potência fornecida à máquina para magnetizar os seus enrolamentos é inferior à potência devolvida em fase de desmagnetização. Assim, conclui-se que, embora possam ser efetuados melhoramentos, o objetivo de gerar energia com uma máquina de relutância a uma velocidade de 1500rpm foi alcançado.

Tabela 5 - Valores de potência medidos - ensaio gerador 1500rpm.

	Fornecida	Obtida
Potência (w)	93.4	98.4

5.2.2. Gerador - 3000rpm

Os gráficos das Figura 50, Figura 51 e Figura 52 apresentam, respectivamente, os resultados das formas de onda obtidas por simulação da corrente, da tensão e da corrente e da tensão em uma das fases da máquina a funcionar com uma velocidade de 3000rpm.

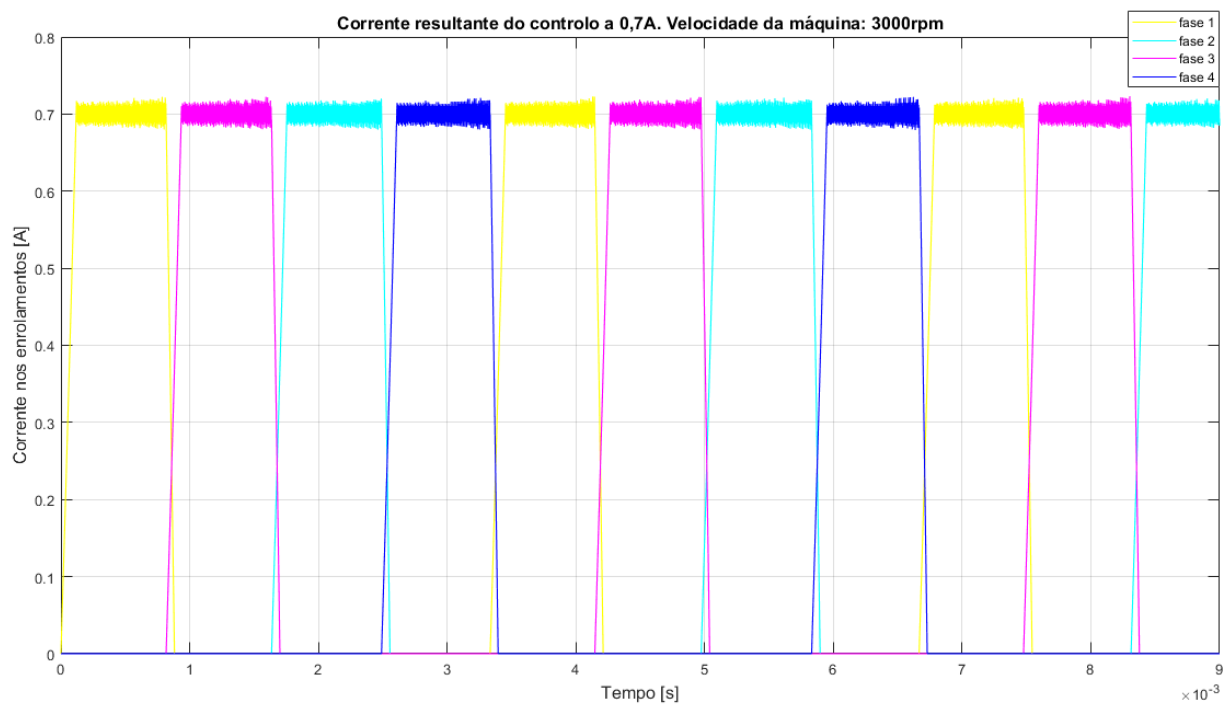


Figura 50 - Comportamento da corrente nas diferentes fases da máquina - simulação gerador 3000rpm.

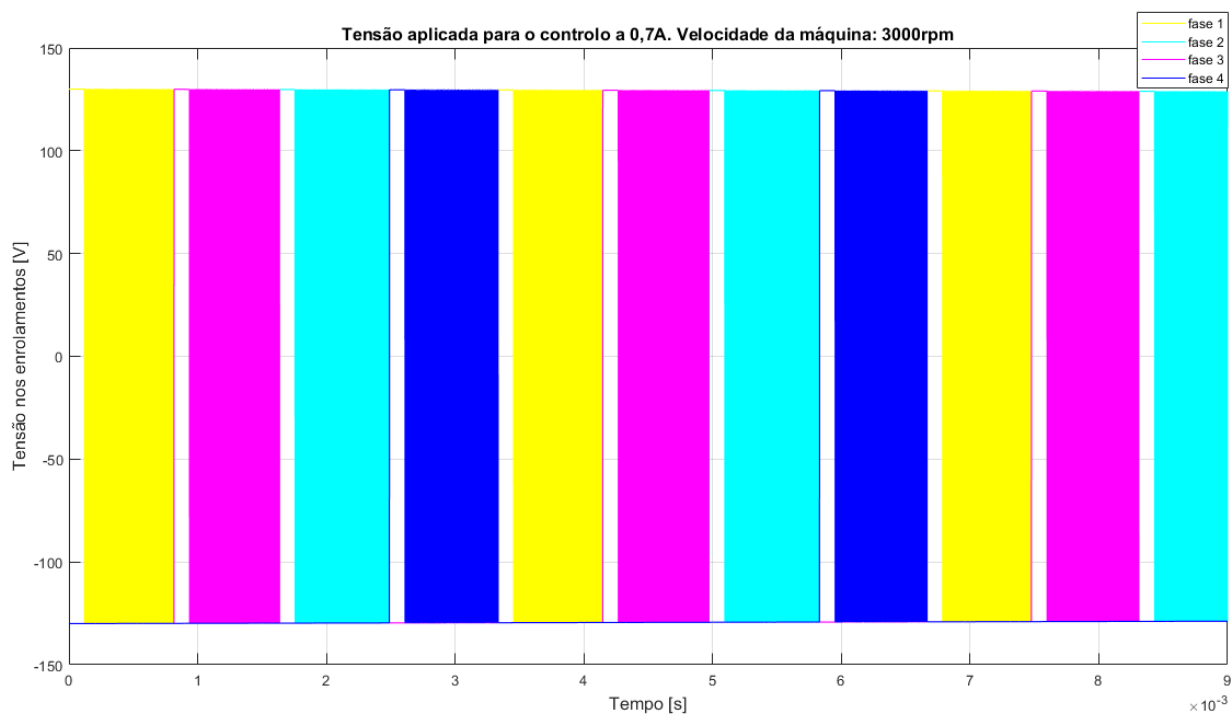


Figura 51 - Comportamento da tensão nas diferentes fases da máquina - simulação gerador 3000rpm.

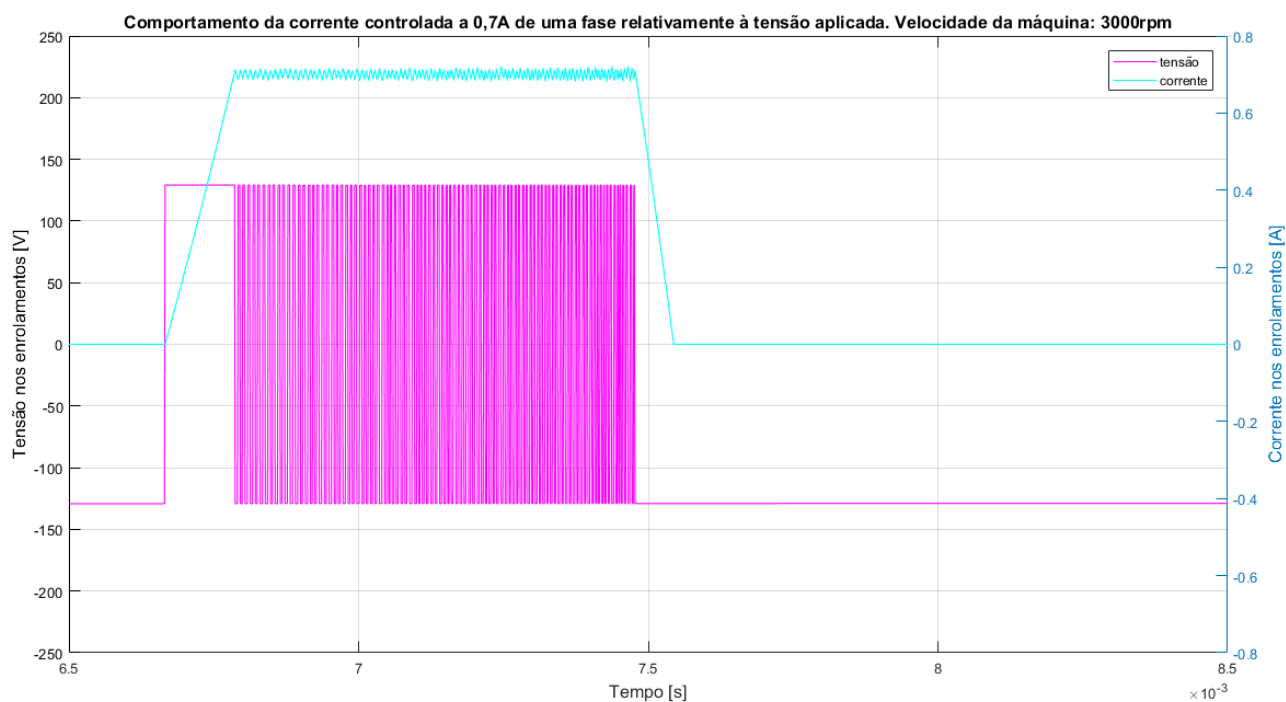


Figura 52 - Comportamento da corrente e da tensão em uma das fases da máquina - simulação gerador 3000rpm.

Comparando as correntes deste ensaio ao realizado com uma velocidade de 1500rpm, é visível que a 3000rpm o controlo histerético é aplicado durante períodos mais curtos. Isto deve-se à maior velocidade, que vai fazer com que os limites de ativação de cada uma das fases sejam ultrapassados mais rapidamente.

Do ensaio laboratorial com a máquina a funcionar a 3000rpm, vem as formas de onda apresentadas pelas Figura 53 e Figura 54 que representam, respetivamente, as correntes e as tensões nas diferentes fases da máquina e pela Figura 55, que representa a corrente e a tensão de uma dessas fases.

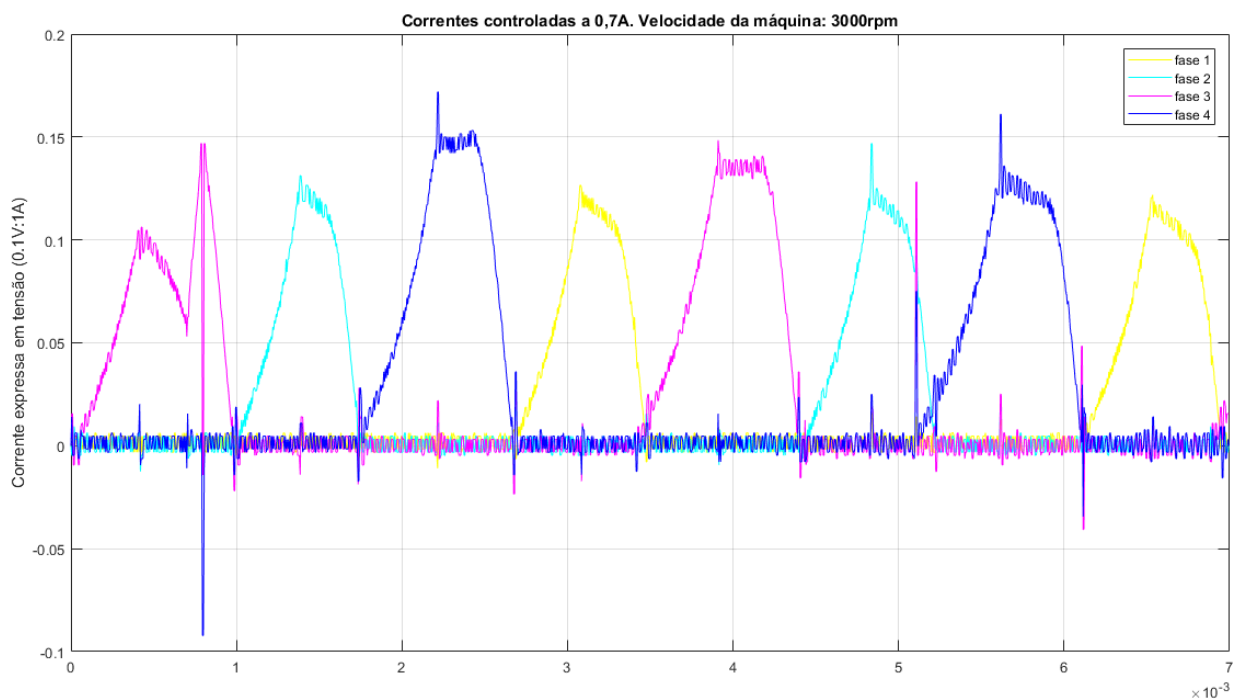


Figura 53 - Comportamento da corrente nas diferentes fases da máquina - ensaio gerador 3000rpm.

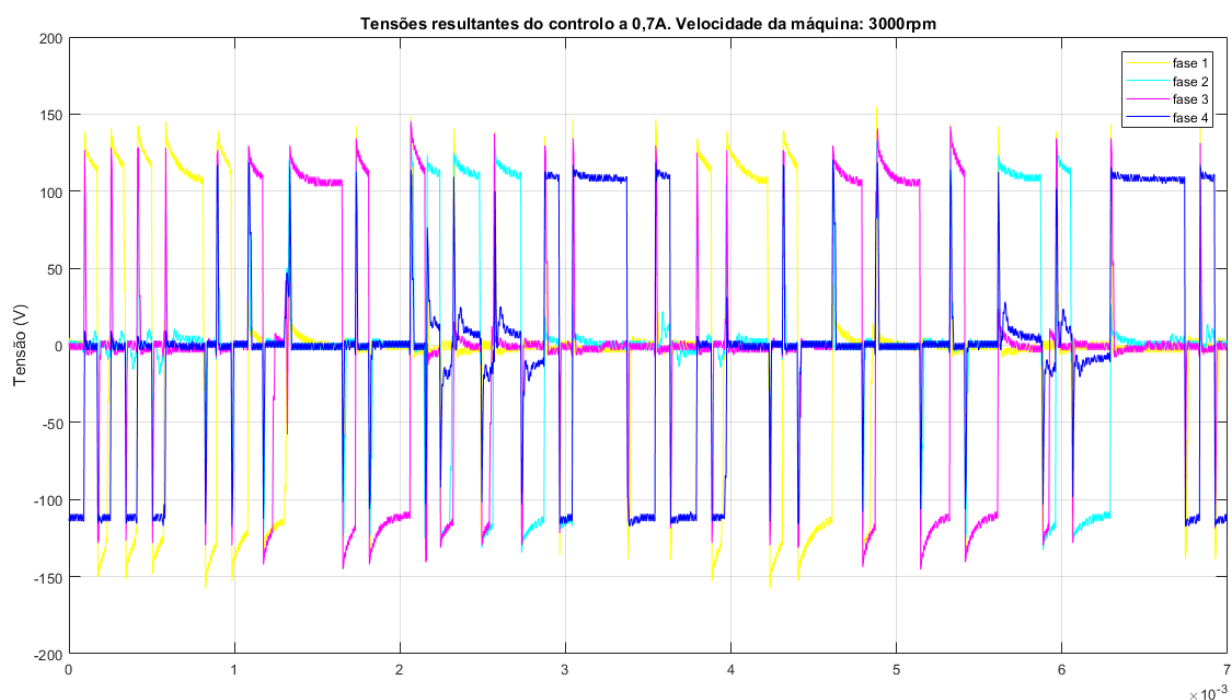


Figura 54 - Comportamento da tensão nas diferentes fases da máquina - ensaio gerador 3000rpm.

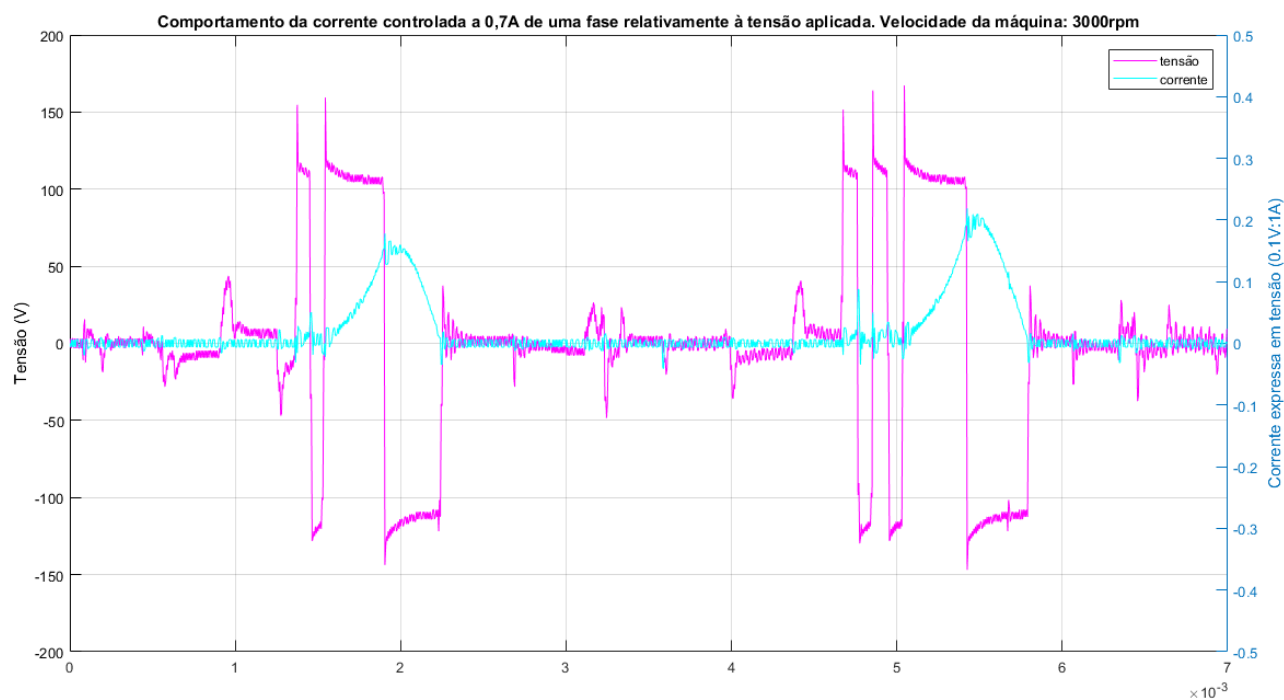


Figura 55 - Comportamento da corrente e da tensão em uma das fases da máquina - ensaio gerador 3000rpm.

Comparando os resultados das simulações aos experimentais, é possível observar muitas semelhanças entre eles, no entanto, nos resultados experimentais as correntes não apresentam a uniformidade que seria de esperar tendo em conta os resultados das simulações. Isto deve-se à frequência de trabalho do controlador que deveria ser maior. Por exemplo, olhando para a Figura 53, é possível ver que o valor da corrente na fase 4 é maior do que o valor da corrente na fase 1; este comportamento deve-se ao controlador que deteta com atraso os limites da fase 1; o mesmo não ocorre na fase 4, que, relativamente à fase 1, tem mais tempo para que os seus enrolamentos se magnetizem, traduzindo-se isto num maior valor de corrente. Outro motivo tem a ver com os limites definidos. Como foi explicado no capítulo 5, foram definidos valores de referência para o alinhamento dos polos em cada uma das fases uma única vez. Depois de definida a referência para cada uma das fases, cada uma delas foi deslocada 5 vezes 60° no sentido de rotação de forma a encontrarem-se todos os pontos de alinhamento entre polos. O que se pode interpretar dos resultados é que este método apresenta falhas pois a tensão é aplicada durante períodos diferentes em cada uma das fases, o que indica que os limites podem não estar perfeitamente definidos.

Tabela 6 - Valores de potência medidos - ensaio gerador 3000rpm.

	Fornecida	Obtida
Potência (w)	78.4	98.4

Para validar o comportamento gerador foram ainda medidas a potência fornecidas à máquina e a potência que a máquina gera (Tabela 6), verificando-se que esta última é superior à primeira.

Assim, apesar dos erros falados anteriormente, os resultados apresentados nos gráficos das simulações e experimentais têm comportamentos semelhantes e a máquina fornece uma potência maior do que a que gasta, podendo assim concluir-se que o objetivo de colocar a máquina a funcionar como geradora de energia a 3000rpm foi alcançado.

5.2.3. Comparação de resultados: 1500rpm - 3000rpm

Analísado o comportamento da máquina como geradora de energia elétrica quando lhe são impostas as velocidades de 1500rpm e 3000rpm, vai agora comparar-se os valores da energia produzida presentes nas Tabela 5 e Tabela 6 para se tentar perceber porque são diferentes.

Assim, verifica-se que quando a máquina trabalha a uma velocidade mais elevada, para as mesmas condições de controlo, gera uma maior quantidade de energia. O controlador tem uma frequência própria de trabalho da qual as leituras dos valores necessários ao controlo dependem. Para o controlo ser implementado é necessário recolher os valores das correntes que circulam nos enrolamentos das máquinas e o valor da posição angular do rotor e, quanto maior a frequência deste processo, mais eficaz o controlo será, melhorando-se assim o funcionamento da máquina. Na Figura 53 é possível ver que, em qualquer uma das fases, quando o controlo é aplicado pela primeira vez, o valor da corrente já ultrapassou a referência assumindo o valor de, pelo menos, 1A, sendo que o controlo tem como limite máximo de corrente 0.71A. Na Figura 55 isto é ainda mais notório, já que é possível ver que quando o controlador atua de forma a inverter a polaridade da tensão, já a corrente ultrapassou o valor de 1A.

Por outro lado, no ensaio a 1500rpm o mesmo já não acontece. Na Figura 47 verifica-se que o controlo não respeita os limites de histerese, no entanto não se verifica uma discrepância tão grande nos valores da corrente, sendo que estes variam à volta dos 0.7A, como é desejado.

Para perceber porque é que a máquina (nas mesmas condições, variando apenas a velocidade) gera mais energia a velocidades maiores, deve olhar-se para as equações (4) e (6) do capítulo 2. Por (6) é possível verificar que quanto maior é a velocidade, maior é o binário eletromagnético e em (4) vê-se que quanto maior é o binário eletromagnético maior é a corrente que circula na fase. Como a corrente é maior, a potência também o será, gerando-se assim mais energia a uma velocidade de 3000rpm do que a 1500rpm.

6. Conclusões

Este trabalho focou-se sobre a máquina de relutância, nomeadamente no seu funcionamento como gerador. Neste contexto, foi efetuado um estado da arte onde se apresentou as diversas topologias do conversor de potência já propostos. De modo a efetuar o estudo desta máquina como gerador, foi desenvolvido um modelo a descrever este comportamento. Também foi apresentada a topologia adotada para este estudo, nomeadamente a do conversor assimétrico em meia ponte. Relativamente a este conversor foi desenvolvido um modelo matemático que foi associado ao modelo da máquina. Para o controlo da máquina foi proposto e desenvolvido um controlador de corrente, nomeadamente do tipo histerético. Os modelos da máquina e conversor de potência, assim como os respetivos controladores, foram implementados no programa Matlab/Simulink.

De modo a comprovar o comportamento da máquina em ambiente de campo, foi desenvolvido um protótipo laboratorial do conversor de potência e respetivos controladores. O trabalho descreveu pormenorizadamente o desenvolvimento e circuitos utilizados do conversor de potência e respetivos controladores. Para este controlo foi utilizado um Arduino Due. De modo a testar a máquina como gerador, foi utilizado um motor acoplado a esta. Utilizou-se também uma carga do tipo resistiva para absorver a energia gerada pelo sistema desenvolvido. Por fim, apresentaram-se diversos resultados obtidos experimentalmente, e que foram comparados com os de simulação de modo a comparar com os obtidos pelos modelos matemáticos desenvolvidos. Através desta comparação

também foi possível verificar a existência de similaridade entre eles, confirmando deste modo que os modelos desenvolvidos permitem representar o comportamento da máquina de relutância como gerador.

Tendo em conta o contexto académico do trabalho, não pode deixar de concluir-se que, a nível pessoal, este resultou numa aprendizagem enorme já que foi uma oportunidade de colocar em prática de forma autónoma muito do conhecimento adquirido da área de máquinas elétricas e eletrónica de potência.

Assim, tendo em conta os resultados práticos e pessoais obtidos, pode concluir-se que os objetivos do trabalho foram conseguidos.

6.1. Perspetivas Futuras

A partir deste trabalho é possível efetuar novos estudos e desenvolvimentos que permitam melhorar o comportamento e rendimento do sistema. Neste contexto, apresenta-se como perspectivas futuras:

- Utilizar um controlador diferente que tenha uma maior frequência de trabalho do que a do Arduíno Due utilizado, o que vai resultar num controlo de corrente mais eficaz, permitindo assim ter-se um melhor controlo sobre a máquina;
- Através da magnetização continua e independente de cada uma das fases, encontrar todos os pontos de alinhamento de polos estator-rotor para que assim se confirmem os limites angulares utilizados neste trabalho, ou então se melhore a definição dos mesmos;
- Desenvolver novos circuitos de controlo;
- Propor novas soluções ao nível da topologia do conversor de potência no sentido de permitir um funcionamento tolerante a falhas.

Referências

- [1] A. E. Fitzgerald, "Variable-Reluctance Machines and Stepping Motors," in *Electric machinery*, McGraw-Hill Education, 1985, pp. 422–466.
- [2] N. Mohan, "Power Electronics: An enabling technology," in *Power Electronics - A first course*, 2013, pp. 1–20.
- [3] A. Emadi, "Automotive Power Electronic Converters," in *Handbook of Automotive Power Electronics and Motor Drives*, 2006, pp. 231–346.
- [4] N. Mohan, "Switch-Mode DC-DC converters: Switching analysis, topology selection and design," in *Power Electronics - A first course*, 2013, pp. 38–73.
- [5] O. Ellabban and H. Abu-Rub, "Switched reluctance motor converter topologies: A review," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology*, 2014.
- [6] M. Barnes and C. Pollock, "Power electronic converters for switched reluctance drives," *IEEE Trans. Power Electron.*, 1998.
- [7] S. M. Mahmoud, M. Z. El-Sherif, E. S. Abdel-Aliem, and M. N. F. Nashed, "Studying Different Types of Power Converters Fed Switched Reluctance Motor," *Int. J. Electron. Electr. Eng.*, 2014.
- [8] H. Bagherian, M. Asgar, and E. Afjei, "A new C-dump converter for bifilar winding switched reluctance motor," in *2011 2nd Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference, PEDSTC 2011*, 2011.
- [9] Hoang Le-Huy, "Switched Reluctance Motor." [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/examples/switched-reluctance-motor.html>.
- [10] MathWorks, "Switched Reluctance Motor," *Model the dynamics of switched reluctance motor*. [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/switchedreluctancemotor.html>.
- [11] MathWorks, "Half-Bridge Converter," *Implement half-bridge power converter*. [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/halfbridgedconverter.html>.
- [12] L. Malesani and P. Tenti, "A Novel Hysteresis Control Method for Current-Controlled Voltage-Source PWM Inverters with Constant Modulation Frequency," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 1990.
- [13] J. W. Ahn, S. G. Oh, J. W. Moon, and Y. M. Hwang, "A three-phase

- switched reluctance motor with two-phase excitation," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 1999.
- [14] M. K. Kumar and G. R. Krishna Murthy, "Modeling and simulation of 8/6 pole switched reluctance motor with closed loop speed control," in *2013 IEEE Asia Pacific Conference on Postgraduate Research in Microelectronics and Electronics (PrimeAsia)*, 2013, pp. 89–95.
 - [15] A. Arifin, I. Al-Bahadly, and S. C. Mukhopadhyay, "State of the Art of Switched Reluctance Generator," *Energy Power Eng.*, 2012.
 - [16] A. Radun, "Generating with the switched reluctance motor," in *Conference Proceedings - IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC*, 1994.
 - [17] L. Malesani and P. Tomasin, "PWM current control techniques of voltage source converters - a survey," in *IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)*, 1993.
 - [18] P. Peres, V. F. Pires, and J. F. Martins, "A novel split-winding fault-tolerant approach for a Switched Reluctance Motor," *45th Annu. Conf. IEEE Ind. Electron. Soc. (IECON 2019)*, pp. 1374–1379, 2019.
 - [19] H. J. N. Spruijt and D. M. OSullivan, "PWM-Switch Modeling of DC-DC Converters," *IEEE Trans. Power Electron.*, 1995.
 - [20] M. Ferreira, "Lei de Ohm," *Rev. Ciência Elem.*, 2015.
 - [21] P. S. R. Committee, "The Impact of Sine-Wave Distortions on Protective Relays," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 1984.
 - [22] "IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems, "IEEE std 519-1992," *Ieee*, 1992.
 - [23] R. A. Matula, "Electrical resistivity of copper, gold, palladium, and silver," *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 1979.
 - [24] LibreTexts, "Magnetic Flux, Induction, and Faraday's Law." [Online]. Available: [https://phys.libretexts.org/Bookshelves/University_Physics/Book%3A_Physics_\(Boundless\)/22%3A_Induction%2C_AC_Circuits%2C_and_Electrical_Technologies/22.1%3A_Magnetic_Flux%2C_Induction%2C_and_Faraday's_Law](https://phys.libretexts.org/Bookshelves/University_Physics/Book%3A_Physics_(Boundless)/22%3A_Induction%2C_AC_Circuits%2C_and_Electrical_Technologies/22.1%3A_Magnetic_Flux%2C_Induction%2C_and_Faraday's_Law).
 - [25] B. S. Lee, H. K. Bae, P. Vijayraghavan, and R. Krishnan, "Design of a linear switched reluctance machine," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 2000.
 - [26] MathWorks, "Lookup Tables." [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/help/simulink/lookup-tables.html>.
 - [27] H. Lu, C. Bailey, and C. Yin, "Design for reliability of power electronics modules," *Microelectron. Reliab.*, 2009.

- [28] J. Lenz and A. S. Edelstein, "Magnetic sensors and their applications," *IEEE Sens. J.*, 2006.
- [29] T. Instruments, "TL08xx JFET-Input Operational Amplifiers." [Online]. Available: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tl082.pdf>.
- [30] K. Brindley, "Zener diode," in *Newnes Electronics Engineers Pocket Book*, 1993.
- [31] G. W. Buckley, "Switched reluctance motors," in *Proceedings of the Electrical/Electronics Insulation Conference*, 1995.

Anexo A - Algoritmo de controlo de gerador MRC

```
//operations
int M1 = 0;
int M2 = 0;
int M3 = 0;
int M4 = 0;
int F1 = 1;
int F2 = 0;
int F3 = 0;
int F4 = 0;
int p = 1;
float aux1 = (3.3/1024.0)*10;
float aux2 = (3.3/1024.0)*360.0;

//inCURRENT
int curSensor_ph1 = A1;
int curSensor_ph2 = A2;
int curSensor_ph3 = A3;
int curSensor_ph4 = A4;
float current_ph1 = 0.0;
float current_ph2 = 0.0;
float current_ph3 = 0.0;
float current_ph4 = 0.0;
```

```

//currentCONTROL
float iRef = 0.7;
float iRefHisterese = 0.01;
float HiRefLow = iRef - iRefHisterese;
float HiRefHigh = iRef + iRefHisterese;

//inPOSITION
int posSensor = A0;
float rotorPos = 0.0;

//out phases transistor pins
int Tpin_ph1_1 = 52;
int Tpin_ph2_1 = 50;
int Tpin_ph3_1 = 48;
int Tpin_ph4_1 = 46;

int Tpin_ph1_2 = 53;
int Tpin_ph2_2 = 51;
int Tpin_ph3_2 = 49;
int Tpin_ph4_2 = 47;

//phase1
float ext_high = 60.0;
float ext_low = 59.5;

```

```
float limitf1_on_1 = 0.0;
float limitf1_off_1 = 14.5;

float limitf1_on_2 = limitf1_on_1 + 60.0;
float limitf1_off_2 = limitf1_off_1 + 60.0;
float limitf1_on_3 = limitf1_on_2 + 60.0;
float limitf1_off_3 = limitf1_off_2 + 60.0;
float limitf1_on_4 = limitf1_on_3 + 60.0;
float limitf1_off_4 = limitf1_off_3 + 60.0;
float limitf1_on_5 = limitf1_on_4 + 60.0;
float limitf1_off_5 = limitf1_off_4 + 60.0;
float limitf1_on_6 = limitf1_on_5 + 60.0;
float limitf1_off_6 = limitf1_off_5 + 60.0;
```

```
//phase 4
```

```
float limitf4_on_1 = 44.5;
float limitf4_off_1 = 59.5;

float limitf4_on_2 = limitf4_on_1 + 60.0;
float limitf4_off_2 = limitf4_off_1 + 60.0;
float limitf4_on_3 = limitf4_on_2 + 60.0;
float limitf4_off_3 = limitf4_off_2 + 60.0;
float limitf4_on_4 = limitf4_on_3 + 60.0;
float limitf4_off_4 = limitf4_off_3 + 60.0;
float limitf4_on_5 = limitf4_on_4 + 60.0;
```

```
float limitf4_off_5 = limitf4_off_4 + 60.0;  
float limitf4_on_6 = limitf4_on_5 + 60.0;  
float limitf4_off_6 = limitf4_off_5 + 60.0;
```

```
//phase 3
```

```
float limitf3_on_1 = 14.5;  
float limitf3_off_1 = 29.5;
```

```
float limitf3_on_2 = limitf3_on_1 + 60.0;  
float limitf3_off_2 = limitf3_off_1 + 60.0;  
float limitf3_on_3 = limitf3_on_2 + 60.0;  
float limitf3_off_3 = limitf3_off_2 + 60.0;  
float limitf3_on_4 = limitf3_on_3 + 60.0;  
float limitf3_off_4 = limitf3_off_3 + 60.0;  
float limitf3_on_5 = limitf3_on_4 + 60.0;  
float limitf3_off_5 = limitf3_off_4 + 60.0;  
float limitf3_on_6 = limitf3_on_5 + 60.0;  
float limitf3_off_6 = limitf3_off_5 + 60.0;
```

```
//phase 2
```

```
float limitf2_on_1 = 29.5;  
float limitf2_off_1 = 44.5;
```

```
float limitf2_on_2 = limitf2_on_1 + 60.0;  
float limitf2_off_2 = limitf2_off_1 + 60.0;  
float limitf2_on_3 = limitf2_on_2 + 60.0;
```

```

float limitf2_off_3 = limitf2_off_2 + 60.0;
float limitf2_on_4 = limitf2_on_3 + 60.0;
float limitf2_off_4 = limitf2_off_3 + 60.0;
float limitf2_on_5 = limitf2_on_4 + 60.0;
float limitf2_off_5 = limitf2_off_4 + 60.0;
float limitf2_on_6 = limitf2_on_5 + 60.0;
float limitf2_off_6 = limitf2_off_5 + 59.0;

```

```

void setup() {
    pinMode(Tpin_ph1_1, OUTPUT);
    pinMode(Tpin_ph2_1, OUTPUT);
    pinMode(Tpin_ph3_1, OUTPUT);
    pinMode(Tpin_ph4_1, OUTPUT);
    pinMode(Tpin_ph1_2, OUTPUT);
    pinMode(Tpin_ph2_2, OUTPUT);
    pinMode(Tpin_ph3_2, OUTPUT);
    pinMode(Tpin_ph4_2, OUTPUT);
}

```

```

void loop() {

    rotorPos = (analogRead(posSensor) * aux2);
    current_ph1 = (analogRead(curSensor_ph1) * aux1);
    current_ph2 = (analogRead(curSensor_ph2) * aux1);
    current_ph3 = (analogRead(curSensor_ph3) * aux1);

```

```

current_ph4 = (analogRead(curSensor_ph4) * aux1);

if (p == 1) {
    if((rotorPos >= limitf1_on_1 && rotorPos < limitf1_off_1) || (rotorPos >=
limitf1_on_2 && rotorPos < limitf1_off_2) || (rotorPos >= limitf1_on_3 && ro-
torPos < limitf1_off_3) ||
        (rotorPos >= limitf1_on_4 && rotorPos < limitf1_off_4) || (rotorPos >=
limitf1_on_5 && rotorPos < limitf1_off_5) || (rotorPos >= limitf1_on_6 && ro-
torPos < limitf1_off_6)) {
        F1 = 1 ;
    }

    if((rotorPos >= limitf4_on_1 && rotorPos < limitf4_off_1) || (rotorPos >=
limitf4_on_2 && rotorPos < limitf4_off_2) || (rotorPos >= limitf4_on_3 && ro-
torPos < limitf4_off_3) ||
        (rotorPos >= limitf4_on_4 && rotorPos < limitf4_off_4) || (rotorPos >=
limitf4_on_5 && rotorPos < limitf4_off_5) || (rotorPos >= limitf4_on_6 && ro-
torPos < limitf4_off_6)) {
        F4 = 1;
    }

    if((rotorPos >= limitf3_on_1 && rotorPos < limitf3_off_1) || (rotorPos >=
limitf3_on_2 && rotorPos < limitf3_off_2) || (rotorPos >= limitf3_on_3 && ro-
torPos < limitf3_off_3) ||
        (rotorPos >= limitf3_on_4 && rotorPos < limitf3_off_4) || (rotorPos >=
limitf3_on_5 && rotorPos < limitf3_off_5) || (rotorPos >= limitf3_on_6 && ro-
torPos < limitf3_off_6)) {
        F3 = 1;
    }
}

```



```

        if((rotorPos >= limitf2_on_1 && rotorPos < limitf2_off_1) || (rotorPos >=
limitf2_on_2 && rotorPos < limitf2_off_2) || (rotorPos >= limitf2_on_3 && ro-
torPos < limitf2_off_3) ||

        (rotorPos >= limitf2_on_4 && rotorPos < limitf2_off_4) || (rotorPos >=
limitf2_on_5 && rotorPos < limitf2_off_5) || (rotorPos >= limitf2_on_6 && ro-
torPos < limitf2_off_6)) {

            F2 = 1;

        }

        p = 0;

    }

//phase 1 control

    if(((rotorPos >= ext_low && rotorPos < ext_high) || (rotorPos >= lim-
itf1_on_1 && rotorPos < limitf1_off_1) || (rotorPos >= limitf1_on_2 && rotorPos
< limitf1_off_2) || (rotorPos >= limitf1_on_3 && rotorPos < limitf1_off_3) ||

        (rotorPos >= limitf1_on_4 && rotorPos < limitf1_off_4) || (rotorPos >=
limitf1_on_5 && rotorPos < limitf1_off_5) || (rotorPos >= limitf1_on_6 && ro-
torPos < limitf1_off_6)) && F1 == 1) {

        if (current_ph1 <= HiRefLow) {

            digitalWrite(Tpin_ph1_1, HIGH);

            digitalWrite(Tpin_ph1_2, HIGH);

            M1 = 1;

        }

        else if (current_ph1 >= HiRefLow && current_ph1 <= HiRefHigh && M1
== 1) {

```

```

    digitalWrite(Tpin_ph1_1, HIGH);
    digitalWrite(Tpin_ph1_2, HIGH);
}
else if (current_ph1 >= HiRefHigh) {
    digitalWrite(Tpin_ph1_1, LOW);
    digitalWrite(Tpin_ph1_2, LOW);
    M1 = 0;
}
F3 = 1;
F4 = 0;
}
else {
    digitalWrite(Tpin_ph1_1, LOW);
    digitalWrite(Tpin_ph1_2, LOW);
}

```

//phase 4 control

```

if(((rotorPos >= limitf4_on_1 && rotorPos < limitf4_off_1) || (rotorPos >=
limitf4_on_2 && rotorPos < limitf4_off_2) || (rotorPos >= limitf4_on_3 && ro-
torPos < limitf4_off_3) ||

```

```

(rotorPos >= limitf4_on_4 && rotorPos < limitf4_off_4) || (rotorPos >=
limitf4_on_5 && rotorPos < limitf4_off_5) || (rotorPos >= limitf4_on_6 && ro-
torPos < limitf4_off_6)) && F4 == 1) {

```

```

if (current_ph4 <= HiRefLow) {
    digitalWrite(Tpin_ph4_1, HIGH);
    digitalWrite(Tpin_ph4_2, HIGH);
}

```

```

        M4 = 1;
    }
    else if (current_ph4 >= HiRefLow && current_ph4 <= HiRefHigh && M4
== 1) {
        digitalWrite(Tpin_ph4_1, HIGH);
        digitalWrite(Tpin_ph4_2, HIGH);
    }
    else if (current_ph4 >= HiRefHigh) {
        digitalWrite(Tpin_ph4_1, LOW);
        digitalWrite(Tpin_ph4_2, LOW);
        M4 = 0;
    }
    F1 = 1;
    F2 = 0;
}
else {
    digitalWrite(Tpin_ph4_1, LOW);
    digitalWrite(Tpin_ph4_2, LOW);
}

//phase 3 control
if(((rotorPos >= limitf3_on_1 && rotorPos < limitf3_off_1) || (rotorPos >=
limitf3_on_2 && rotorPos < limitf3_off_2) || (rotorPos >= limitf3_on_3 && ro-
torPos < limitf3_off_3) ||
    (rotorPos >= limitf3_on_4 && rotorPos < limitf3_off_4) || (rotorPos >=
limitf3_on_5 && rotorPos < limitf3_off_5) || (rotorPos >= limitf3_on_6 && ro-
torPos < limitf3_off_6)) && F3 == 1) {

```

```

if (current_ph3 <= HiRefLow) {
    digitalWrite(Tpin_ph3_1, HIGH);
    digitalWrite(Tpin_ph3_2, HIGH);
    M3 = 1;
}
else if (current_ph3 >= HiRefLow && current_ph3 <= HiRefHigh && M3
== 1) {
    digitalWrite(Tpin_ph3_1, HIGH);
    digitalWrite(Tpin_ph3_2, HIGH);
}
else if (current_ph3 >= HiRefHigh) {
    digitalWrite(Tpin_ph3_1, LOW);
    digitalWrite(Tpin_ph3_2, LOW);
    M3 = 0;
}
F2 = 1;
F1 = 0;
}
else {
    digitalWrite(Tpin_ph3_1, LOW);
    digitalWrite(Tpin_ph3_2, LOW);
}

//phase 2 control

```

```

        if(((rotorPos >= limitf2_on_1 && rotorPos < limitf2_off_1) || (rotorPos >=
limitf2_on_2 && rotorPos < limitf2_off_2) || (rotorPos >= limitf2_on_3 && ro-
torPos < limitf2_off_3) ||

```

```

        (rotorPos >= limitf2_on_4 && rotorPos < limitf2_off_4) || (rotorPos >=
limitf2_on_5 && rotorPos < limitf2_off_5) || (rotorPos >= limitf2_on_6 && ro-
torPos < limitf2_off_6)) && F2 == 1) {

```

```

        if (current_ph2 <= HiRefLow) {

```

```

            digitalWrite(Tpin_ph2_1, HIGH);

```

```

            digitalWrite(Tpin_ph2_2, HIGH);

```

```

            M2 = 1;

```

```

        }

```

```

        else if (current_ph2 >= HiRefLow && current_ph2 <= HiRefHigh && M2
== 1) {

```

```

            digitalWrite(Tpin_ph2_1, HIGH);

```

```

            digitalWrite(Tpin_ph2_2, HIGH);

```

```

        }

```

```

        else if (current_ph2 >= HiRefHigh) {

```

```

            digitalWrite(Tpin_ph2_1, LOW);

```

```

            digitalWrite(Tpin_ph2_2, LOW);

```

```

            M2 = 0;

```

```

        }

```

```

        F4 = 1;

```

```

        F3 = 0;

```

```

    }

```

```

    else {

```

```

        digitalWrite(Tpin_ph2_1, LOW);

```

```
digitalWrite(Tpin_ph2_2, LOW);  
}  
}
```

Anexo B - Algoritmo de controlo de motor MRC

```
//operations
int M1 = 0;
int M2 = 0;
int M3 = 0;
int M4 = 0;
int F1 = 1;
int F2 = 0;
int F3 = 0;
int F4 = 0;
int p = 1;
float aux1 = (3.3/1024.0)*10;
float aux2 = (3.3/1024.0)*360.0;

//inCURRENT
int curSensor_ph1 = A1;
int curSensor_ph2 = A2;
int curSensor_ph3 = A3;
int curSensor_ph4 = A4;
float current_ph1 = 0.0;
float current_ph2 = 0.0;
float current_ph3 = 0.0;
float current_ph4 = 0.0;
```

```

//currentCONTROL
float iRef = 1.5;
float iRefHisterese = 0.05;
float HiRefLow = iRef - iRefHisterese;
float HiRefHigh = iRef + iRefHisterese;

//inPOSITION
int posSensor = A0;
float rotorPos = 0.0;

//out phases transistor pins
int Tpin_ph1_1 = 52;
int Tpin_ph2_1 = 50;
int Tpin_ph3_1 = 48;
int Tpin_ph4_1 = 46;

int Tpin_ph1_2 = 53;
int Tpin_ph2_2 = 51;
int Tpin_ph3_2 = 49;
int Tpin_ph4_2 = 47;

//phase1
float limitf1_on_1 = 45.0;
float limitf1_off_1 = 60.0;

```



```
float limitf1_on_2 = limitf1_on_1 + 60.0;
float limitf1_off_2 = limitf1_off_1 + 60.0;
float limitf1_on_3 = limitf1_on_2 + 60.0;
float limitf1_off_3 = limitf1_off_2 + 60.0;
float limitf1_on_4 = limitf1_on_3 + 60.0;
float limitf1_off_4 = limitf1_off_3 + 60.0;
float limitf1_on_5 = limitf1_on_4 + 60.0;
float limitf1_off_5 = limitf1_off_4 + 60.0;
float limitf1_on_6 = limitf1_on_5 + 60.0;
float limitf1_off_6 = limitf1_off_5 + 60.0;
```

```
//phase 4
```

```
float limitf4_on_1 = 30.0;
float limitf4_off_1 = 45.0;
```

```
float limitf4_on_2 = limitf4_on_1 + 60.0;
float limitf4_off_2 = limitf4_off_1 + 60.0;
float limitf4_on_3 = limitf4_on_2 + 60.0;
float limitf4_off_3 = limitf4_off_2 + 60.0;
float limitf4_on_4 = limitf4_on_3 + 60.0;
float limitf4_off_4 = limitf4_off_3 + 60.0;
float limitf4_on_5 = limitf4_on_4 + 60.0;
float limitf4_off_5 = limitf4_off_4 + 60.0;
float limitf4_on_6 = limitf4_on_5 + 60.0;
float limitf4_off_6 = limitf4_off_5 + 60.0;
```

```
//phase 3  
float limitf3_on_1 = 0.0;  
float limitf3_off_1 = 15.0;  
  
float limitf3_on_2 = limitf3_on_1 + 60.0;  
float limitf3_off_2 = limitf3_off_1 + 60.0;  
float limitf3_on_3 = limitf3_on_2 + 60.0;  
float limitf3_off_3 = limitf3_off_2 + 60.0;  
float limitf3_on_4 = limitf3_on_3 + 60.0;  
float limitf3_off_4 = limitf3_off_3 + 60.0;  
float limitf3_on_5 = limitf3_on_4 + 60.0;  
float limitf3_off_5 = limitf3_off_4 + 60.0;  
float limitf3_on_6 = limitf3_on_5 + 60.0;  
float limitf3_off_6 = limitf3_off_5 + 60.0;
```

```
//phase 2  
float limitf2_on_1 = 15.0;  
float limitf2_off_1 = 30.0;  
  
float limitf2_on_2 = limitf2_on_1 + 60.0;  
float limitf2_off_2 = limitf2_off_1 + 60.0;  
float limitf2_on_3 = limitf2_on_2 + 60.0;  
float limitf2_off_3 = limitf2_off_2 + 60.0;  
float limitf2_on_4 = limitf2_on_3 + 60.0;
```

```

float limitf2_off_4 = limitf2_off_3 + 60.0;
float limitf2_on_5 = limitf2_on_4 + 60.0;
float limitf2_off_5 = limitf2_off_4 + 60.0;
float limitf2_on_6 = limitf2_on_5 + 60.0;
float limitf2_off_6 = limitf2_off_5 + 60.0;

```

```

void setup() {
    pinMode(Tpin_ph1_1, OUTPUT);
    pinMode(Tpin_ph2_1, OUTPUT);
    pinMode(Tpin_ph3_1, OUTPUT);
    pinMode(Tpin_ph4_1, OUTPUT);
    pinMode(Tpin_ph1_2, OUTPUT);
    pinMode(Tpin_ph2_2, OUTPUT);
    pinMode(Tpin_ph3_2, OUTPUT);
    pinMode(Tpin_ph4_2, OUTPUT);
}

```

```

void loop() {

    rotorPos = (analogRead(posSensor) * aux2);
    current_ph1 = (analogRead(curSensor_ph1) * aux1);
    current_ph2 = (analogRead(curSensor_ph2) * aux1);
    current_ph3 = (analogRead(curSensor_ph3) * aux1);
    current_ph4 = (analogRead(curSensor_ph4) * aux1);

```

```

if (p == 1) {
    if((rotorPos >= limitf1_on_1 && rotorPos < limitf1_off_1) || (rotorPos >=
limitf1_on_2 && rotorPos < limitf1_off_2) || (rotorPos >= limitf1_on_3 && ro-
torPos < limitf1_off_3) ||
        (rotorPos >= limitf1_on_4 && rotorPos < limitf1_off_4) || (rotorPos >=
limitf1_on_5 && rotorPos < limitf1_off_5) || (rotorPos >= limitf1_on_6 && ro-
torPos < limitf1_off_6)) {
        F1 = 1 ;
    }

    if((rotorPos >= limitf4_on_1 && rotorPos < limitf4_off_1) || (rotorPos >=
limitf4_on_2 && rotorPos < limitf4_off_2) || (rotorPos >= limitf4_on_3 && ro-
torPos < limitf4_off_3) ||
        (rotorPos >= limitf4_on_4 && rotorPos < limitf4_off_4) || (rotorPos >=
limitf4_on_5 && rotorPos < limitf4_off_5) || (rotorPos >= limitf4_on_6 && ro-
torPos < limitf4_off_6)) {
        F4 = 1;
    }

    if((rotorPos >= limitf3_on_1 && rotorPos < limitf3_off_1) || (rotorPos >=
limitf3_on_2 && rotorPos < limitf3_off_2) || (rotorPos >= limitf3_on_3 && ro-
torPos < limitf3_off_3) ||
        (rotorPos >= limitf3_on_4 && rotorPos < limitf3_off_4) || (rotorPos >=
limitf3_on_5 && rotorPos < limitf3_off_5) || (rotorPos >= limitf3_on_6 && ro-
torPos < limitf3_off_6)) {
        F3 = 1;
    }
}

```

```

        if((rotorPos >= limitf2_on_1 && rotorPos < limitf2_off_1) || (rotorPos >=
limitf2_on_2 && rotorPos < limitf2_off_2) || (rotorPos >= limitf2_on_3 && ro-
torPos < limitf2_off_3) ||

```

```

        (rotorPos >= limitf2_on_4 && rotorPos < limitf2_off_4) || (rotorPos >=
limitf2_on_5 && rotorPos < limitf2_off_5) || (rotorPos >= limitf2_on_6 && ro-
torPos < limitf2_off_6)) {

```

```

            F2 = 1;

```

```

        }

```

```

        p = 0;

```

```

    }

```

```

//phase 1 control

```

```

        if(((rotorPos >= limitf1_on_1 && rotorPos < limitf1_off_1) || (rotorPos >=
limitf1_on_2 && rotorPos < limitf1_off_2) || (rotorPos >= limitf1_on_3 && ro-
torPos < limitf1_off_3) ||

```

```

        (rotorPos >= limitf1_on_4 && rotorPos < limitf1_off_4) || (rotorPos >=
limitf1_on_5 && rotorPos < limitf1_off_5) || (rotorPos >= limitf1_on_6 && ro-
torPos < limitf1_off_6)) && F1 == 1) {

```

```

        if (current_ph1 <= HiRefLow) {

```

```

            digitalWrite(Tpin_ph1_1, HIGH);

```

```

            digitalWrite(Tpin_ph1_2, HIGH);

```

```

            M1 = 1;

```

```

        }

```

```

        else if (current_ph1 >= HiRefLow && current_ph1 <= HiRefHigh && M1
== 1) {

```

```

    digitalWrite(Tpin_ph1_1, HIGH);
    digitalWrite(Tpin_ph1_2, HIGH);
}
else if (current_ph1 >= HiRefHigh) {
    digitalWrite(Tpin_ph1_1, LOW);
    digitalWrite(Tpin_ph1_2, LOW);
    M1 = 0;
}
F3 = 1;
F4 = 0;
}
else {
    digitalWrite(Tpin_ph1_1, LOW);
    digitalWrite(Tpin_ph1_2, LOW);
}

```

//phase 4 control

```

if(((rotorPos >= limitf4_on_1 && rotorPos < limitf4_off_1) || (rotorPos >=
limitf4_on_2 && rotorPos < limitf4_off_2) || (rotorPos >= limitf4_on_3 && ro-
torPos < limitf4_off_3) ||

```

```

(rotorPos >= limitf4_on_4 && rotorPos < limitf4_off_4) || (rotorPos >=
limitf4_on_5 && rotorPos < limitf4_off_5) || (rotorPos >= limitf4_on_6 && ro-
torPos < limitf4_off_6)) && F4 == 1) {

```

```

if (current_ph4 <= HiRefLow) {
    digitalWrite(Tpin_ph4_1, HIGH);
    digitalWrite(Tpin_ph4_2, HIGH);
}

```

```

        M4 = 1;
    }
    else if (current_ph4 >= HiRefLow && current_ph4 <= HiRefHigh && M4
== 1) {
        digitalWrite(Tpin_ph4_1, HIGH);
        digitalWrite(Tpin_ph4_2, HIGH);
    }
    else if (current_ph4 >= HiRefHigh) {
        digitalWrite(Tpin_ph4_1, LOW);
        digitalWrite(Tpin_ph4_2, LOW);
        M4 = 0;
    }
    F1 = 1;
    F2 = 0;
}
else {
    digitalWrite(Tpin_ph4_1, LOW);
    digitalWrite(Tpin_ph4_2, LOW);
}

//phase 3 control
if(((rotorPos >= limitf3_on_1 && rotorPos < limitf3_off_1) || (rotorPos >=
limitf3_on_2 && rotorPos < limitf3_off_2) || (rotorPos >= limitf3_on_3 && ro-
torPos < limitf3_off_3) ||
    (rotorPos >= limitf3_on_4 && rotorPos < limitf3_off_4) || (rotorPos >=
limitf3_on_5 && rotorPos < limitf3_off_5) || (rotorPos >= limitf3_on_6 && ro-
torPos < limitf3_off_6)) && F3 == 1) {

```

```

if (current_ph3 <= HiRefLow) {
    digitalWrite(Tpin_ph3_1, HIGH);
    digitalWrite(Tpin_ph3_2, HIGH);
    M3 = 1;
}
else if (current_ph3 >= HiRefLow && current_ph3 <= HiRefHigh && M3
== 1) {
    digitalWrite(Tpin_ph3_1, HIGH);
    digitalWrite(Tpin_ph3_2, HIGH);
}
else if (current_ph3 >= HiRefHigh) {
    digitalWrite(Tpin_ph3_1, LOW);
    digitalWrite(Tpin_ph3_2, LOW);
    M3 = 0;
}
F2 = 1;
F1 = 0;
}
else {
    digitalWrite(Tpin_ph3_1, LOW);
    digitalWrite(Tpin_ph3_2, LOW);
}

//phase 2 control

```



```

        if(((rotorPos >= limitf2_on_1 && rotorPos < limitf2_off_1) || (rotorPos >=
limitf2_on_2 && rotorPos < limitf2_off_2) || (rotorPos >= limitf2_on_3 && ro-
torPos < limitf2_off_3) ||

```

```

        (rotorPos >= limitf2_on_4 && rotorPos < limitf2_off_4) || (rotorPos >=
limitf2_on_5 && rotorPos < limitf2_off_5) || (rotorPos >= limitf2_on_6 && ro-
torPos < limitf2_off_6)) && F2 == 1) {

```

```

        if (current_ph2 <= HiRefLow) {

```

```

            digitalWrite(Tpin_ph2_1, HIGH);

```

```

            digitalWrite(Tpin_ph2_2, HIGH);

```

```

            M2 = 1;

```

```

        }

```

```

        else if (current_ph2 >= HiRefLow && current_ph2 <= HiRefHigh && M2
== 1) {

```

```

            digitalWrite(Tpin_ph2_1, HIGH);

```

```

            digitalWrite(Tpin_ph2_2, HIGH);

```

```

        }

```

```

        else if (current_ph2 >= HiRefHigh) {

```

```

            digitalWrite(Tpin_ph2_1, LOW);

```

```

            digitalWrite(Tpin_ph2_2, LOW);

```

```

            M2 = 0;

```

```

        }

```

```

        F4 = 1;

```

```

        F3 = 0;

```

```

    }

```

```

    else {

```

```

        digitalWrite(Tpin_ph2_1, LOW);

```

```
    digitalWrite(Tpin_ph2_2, LOW);  
  }  
}
```